

Advanced Engineering Research

Теоретический и научно-практический журнал

Том 22 № 4 2022

Vol. 22 no. 4 2022

ISSN 2687-1653

1. Механика
   Mechanics
2. Машиностроение и машиноведение
   Machine Building and Machine Science
3. Информатика, вычислительная техника и управление
   Information Technology, Computer Science, and Management

DOI 10.23947/2687-1653

vestnik-donstu.ru

Advanced Engineering Research

Т. 22, № 4, 2022

Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
октябрь-декабрь 2022 г.

ISSN 2687-1653 (online)
DOI: 10.23947/2687-1653

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Название журнала (до августа 2020): Вестник Донского государственного технического университета

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)
1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)
1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
2.5.3 – Трение и износ в машинах (технические науки)
2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)
2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и научную электронную библиотеку CyberLeninka. Индексируется международной базой EBSCO (Academic Search Ultimate Magazines and Journal), Dimensions, а также является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Учредитель и издатель журнала является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Над номером работали:

И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)

Адрес учредителя, издателя и редакции:

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2–738–372
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik-donstu.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 531.01

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305

Научная статья



Разработка методов управления свойствами магнитно-реологической среды с целью регулирования жесткости звена переменной длины экзоскелета



А. О. Блинов[1] ✉, А. В. Борисов[1], Л. В. Кончина[1], М. А. Новикова[1], А. В. Чигарев[2]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1

[2] Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 4

✉ alex-blinov67@yandex.ru

Аннотация

Введение. Статья посвящена одной из проблем создания экзоскелетов — управлению свойствами магнитно-реологической жидкости в звеньях переменной длины с регулируемой жесткостью. По исследованиям отечественных и зарубежных авторов оценена разработанность и актуальность темы. Выявлен недостаток известных моделей экзоскелетов — использование абсолютно твердых звеньев, динамика которых не передает динамику опорно-двигательного аппарата человека. Цель научных изысканий — формирование нового направления развития экзоскелетов, достаточно точно моделирующих биомеханику движений.

Материалы и методы. Рассмотрены разные состояния конструкций звеньев переменной длины с магнитно-реологической жидкостью. Отмечено, что звенья работают по принципу магнитных амортизаторов и состоят из штока с поршнем, электромагнитных катушек и корпуса, заполненного магнитно-реологической жидкостью. Визуализировано и математически представлено упорядочивающее воздействие внешнего магнитного поля на частицы магнитно-реологической жидкости. Показано значение для данной системы таких факторов, как: время, плотность зарядов, напряженность магнитного поля, а также векторы электрической и магнитной индукции, электрической напряженности и плотности электрического тока. Определен входной параметр, влияющий на поведение магнитно-реологической жидкости. Это напряженность магнитного поля. Показано, что вязкость жидкости меняется в зависимости от формы магнитных частиц (вытянутый или сплюснутый эллипсоид).

Результаты исследования. Исследованы и визуализированы зависимости, принципиальные для решения поставленной задачи. Приняты как базовые параметры напряженность магнитного поля, а также угол между вектором, направленным вдоль прямой, соединяющей центры двух микронных частиц, и вектором напряженности внешнего магнитного поля. Показано, каким образом от них зависят магнитный момент, напряжение и его антисимметричная часть. Установлено, что для управления свойствами магнитно-реологической жидкости необходимо менять:

– напряженность внешнего магнитного поля;

– угол между напряженностью внешнего магнитного поля и вектором ориентации между диполями.

Сравниваются два значения силы: для заданной конструкции звена и фиксируемые при ходьбе в голени человека. Установлена согласованность этих показателей.

Обсуждение и заключения. Результаты научных изысканий позволили представить:

– метод управления свойствами магнитно-реологической жидкости внешним магнитным полем;

– модель звена переменной длины с регулируемой жесткостью.

Полученный результат можно использовать при моделировании многозвенных конструкций для создания комфортных экзоскелетов, синхронно взаимодействующих с опорно-двигательным аппаратом человека как

единая человеко-машинная система. Разработка применима для решения значимых социальных и экономических задач.

Ключевые слова: экзоскелет, магнитно-реологическая жидкость, звено переменной длины, регулируемая жесткость, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, напряженность магнитно-реологической жидкости, магнитный момент.

Благодарности. Авторы выражают признательность рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Финансирование. Исследование проводилось при финансовой поддержке Российского научного фонда. Грант № 22–21–00491, https://rscf.ru/project/22-21-00491/

Для цитирования. Разработка методов управления свойствами магнитно-реологической среды с целью регулирования жесткости звена переменной длины экзоскелета / А. О. Блинов, А. В. Борисов, Л. В. Кончина [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 296–305. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305

Original article

Development of Properties Control Methods for Magnetorheological Medium to Regulate the Stiffness of Exoskeleton Variable-Length Link

Alexander O. Blinov[1] ✉, **Andrey V. Borisov**[1], **Larisa V. Konchina**[1], **Marina A. Novikova**[1], **Anatoly V. Chigarev**[2]

[1] National Research University "MPEI", Smolensk Branch, 1, Energeticheskii proezd, Smolensk, Russian Federation

[2] Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Avenue, Minsk, Republic of Belarus

✉ alex-blinov67@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article investigated one of the problems of creating exoskeletons — controlling the properties of magnetic rheological fluid in links of variable length with adjustable stiffness. Based on the research of domestic and foreign authors, the development and urgency of the topic was evaluated. The disadvantage of known exoskeleton models has been specified, i.e., the use of absolutely solid links, whose dynamics does not convey the dynamics of the human musculoskeletal system. The scientific research aimed at the formation of a new direction in the development of exoskeletons that accurately simulate the biomechanics of movements.

Materials and Methods. Different states of structures of variable-length links with a magnetorheological fluid were studied. It has been noted that the links work on the principle of magnetic shock absorbers and consist of a piston rod, electromagnetic coils, and a housing filled with magnetorheological fluid. The ordering effect of an external magnetic field on the particles of a magnetorheological fluid was visualized and mathematically presented. The significance of such factors as time, charge density, magnetic field strength, as well as vectors of electric and magnetic induction, electric intensity and electric current density for this system was shown. The input parameter affecting the behavior of the magnetorheological fluid was determined. This was the magnetic field intensity. It was shown that the viscosity of the liquid varied depending on the shape of the magnetic particles (oblong or oblate ellipsoid).

Results. The dependences that were fundamental for solving the task were investigated and visualized. The magnetic field strength and the angle between the vector directed along a straight line connecting the centers of two micron particles, and the vector of the external magnetic field strength were taken as the basic parameters. It was shown how the magnetic moment, voltage and its antisymmetric part depended on them. It was established that to control the properties of a magnetorheological fluid, it was required to change:

– the external magnetic field intensity;

– the angle between the external magnetic field intensity and the orientation vector between the dipoles.

Two values of force were compared: one – for a given link design, and the other — fixed when walking in the lower leg of a person. The consistency of these indicators was established.

Discussion and Conclusion. The scientific research results allowed us to present:

– a method for controlling the properties of a magnetorheological fluid by an external magnetic field;

– a variable-length link model with adjustable stiffness.

The results obtained can be used in modeling multilink structures to create comfortable exoskeletons that interact synchronously with the human musculoskeletal system as a single human-machine system. The development is applicable to solving significant social and economic problems.

Keywords: exoskeleton, magnetorheological fluid, variable-length link, adjustable stiffness, magnetic induction, magnetic field strength, magnetorheological fluid intensity, magnetic moment.

Acknowledgements. The authors would like to thank the reviewers for valuable comments that contributed to the improvement of the article.

Funding information. The study was conducted with the financial support of the Russian Science Foundation (grant no. 22–21–00491), https://rscf.ru/project/22-21-00491/

For citation. A. O. Blinov, A. V. Borisov, L. V. Konchina, M. A. Novikova, A. V. Chigarev. Development of Properties Control Methods for Magnetorheological Medium to Regulate the Stiffness of Exoskeleton Variable-Length Link. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 296–305. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305

Введение. Ранее выполненное моделирование позволило выявить изменения длин звеньев опорно-двигательного аппарата человека, их размеров, скоростей движения, определить усилия в кинематической цепи [1]. Это позволило сформулировать требования к свойствам и режимам функционирования звена экзоскелета, повторяющего основные биомеханические свойства соответствующего звена пользователя. Цель исследования заключается в разработке модели звена переменной длины с регулируемой жесткостью для создания комфортных экзоскелетов нового поколения, адекватно воспроизводящих действия опорно-двигательного аппарата человека. Экзоскелеты используют в медицинских и восстановительных центрах для вертикализации положения тела пациента, в космонавтике при создании скафандров и реабилитационных костюмов.

Для управления моделями звеньев с регулируемой жесткостью можно использовать магнитные поля, действующие на магнитно-реологическую среду. Экзоскелеты с регулируемой жесткостью звеньев переменной длины обеспечат устойчивые, безопасные, удобные локомоции человека. Реализация в таких моделях приводов для управляемого изменения конфигураций представляет практическую ценность, что определяет актуальность исследования.

С 2010 по 2020 год в базе «Российский индекс научного цитирования» количество публикаций с ключевым словом «экзоскелет» увеличилось в 10 раз (было менее 50 стало более 500). С 2015 года растет число патентов на экзоскелеты и их компоненты, чаще регистрируется профильное программное обеспечение. В настоящее время нет данных о звеньях экзоскелетов переменной длины с регулируемой жесткостью. Упоминаются решения с мягкими электрическими насосами и пневматическим кольцевым генератором, однако в них не применяются магнитно-реологические жидкости[1]. Есть описание актуатора с магнитно-реологической жидкостью, вязкость которой меняется под действием магнитного поля [2–4][2]. Предлагается использовать магнитно-реологические материалы для создания приводов экзоскелетов[3]. В [4–6] изучено применение магнитно-реологической жидкости при создании привода для коленного сустава экзоскелета. Крутящий момент в этом суставе оказывает демпфирующее действие при ходьбе [7]. В [8–9] рассматриваются магнитно-реологические приводы. Пока не разработан экзоскелет, звенья которого можно регулировать по длине и жесткости.

Материалы и методы. Предполагается, что звено экзоскелета будет работать по принципу магнитных амортизаторов [10]. Звено состоит из штока с поршнем AE, корпуса CB, заполненного магнитно-реологической жидкостью, и электромагнитных катушек (рис. 1).

[1] Мягких роботов оснастили электрофлюидными логическими схемами // planet-today.ru : [сайт]. URL: https://planet-today.ru/novosti/nauka/item/110728-myagkikh-robotov-osnastili-elektroflyuidnymi-logicheskimi-skhemami (дата обращения: 10.09.2022).
[2] Psomopoulou E. A Simple Controller for a Variable Stiffness Joint with Uncertain Dynamics and Prescribed Performance Guarantees // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012. P. 5071–5076. https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385859
[3] Chen J., Liao W. Design and control of a Magnetorheological actuator for leg exoskeleton // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2007. P. 1388–1393. https://doi.org/10.1109/ROBIO.2007.4522367

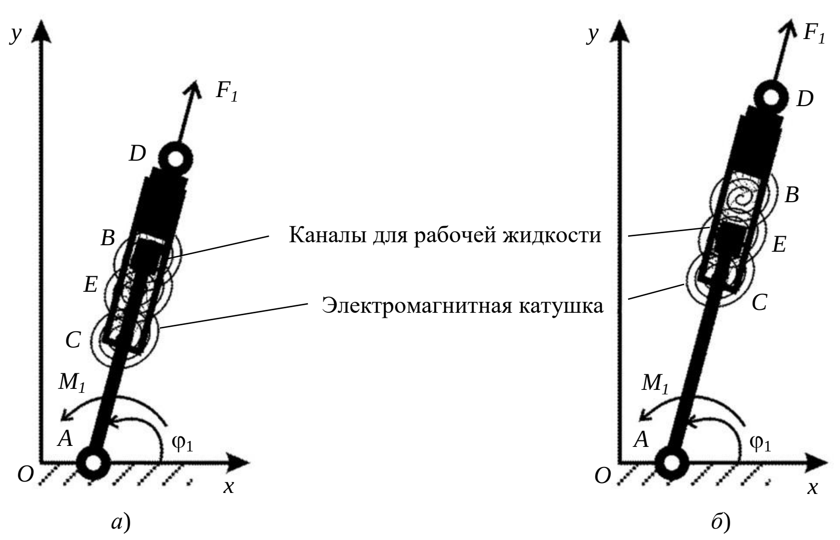


Рис. 1. Конструкция звена переменной длины с магнитно-реологической жидкостью:
а — звено в сжатом состоянии в фазе опоры на него; *б* — звено в растянутом состоянии в фазе переноса (рисунок авторов)

В точках A и D расположены шарниры, обеспечивающие соединение и относительный поворот звеньев в экзоскелете. Магнитное поле создается за счет электромагнитной катушки и воздействует на магнитно-реологическую жидкость внутри звена. Магнитные частицы жидкости под влиянием электромагнитного поля упорядочиваются, и реологические свойства меняются.

Свойства магнитно-реологической жидкости обусловлены поляризацией, поэтому магнитные частицы выстраиваются вдоль силовых линий (рис. 2).

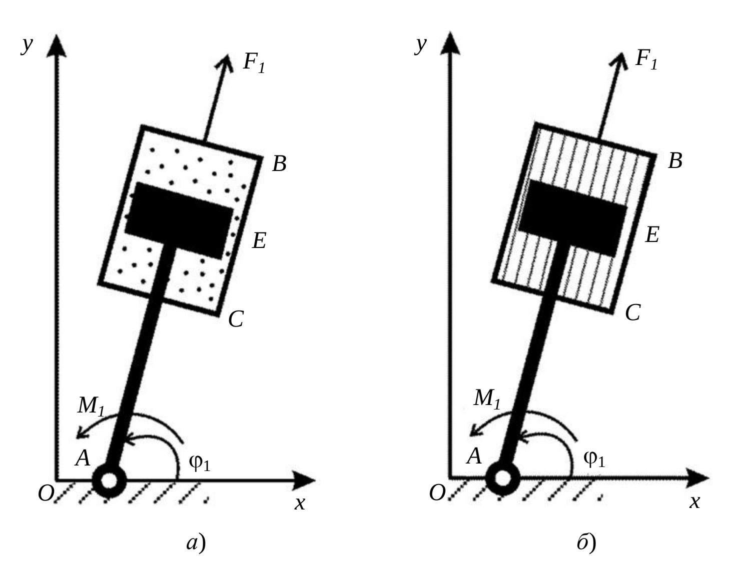


Рис. 2. Частицы магнитно-реологической жидкости в цилиндрической части звена: *а* — магнитные частицы расположены случайным образом без приложения внешнего магнитного поля; *б* — выстроившиеся цепочки ориентированных магнитных частиц вдоль силовых линий под действием внешнего магнитного поля (рисунок авторов)

Под влиянием внешнего электромагнитного поля в магнитно-реологической жидкости возникают поляризация и намагниченность. Для такой жидкости уравнения Максвелла имеют вид:

$$rot\vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, div\vec{B} = 0,$$
$$rot\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t}, div\vec{D} = \rho_e. \qquad (1)$$

Здесь $\vec{D}$ — вектор электрической индукции; $\vec{B}$ — вектор магнитной индукции; t — время; $\vec{E}$ — вектор электрической напряженности; $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля; ρ_e — плотность зарядов; $\vec{j}$ — вектор плотности электрического тока.

Вектор плотности электрического тока связан с напряженностью электрического поля:

$$\vec{j} = \gamma \times \vec{E}, \qquad (2)$$

где γ — удельная проводимость вещества.

Механика

Магнитная частица в магнитно-реологической жидкости — это диполь, то есть система двух равных по модулю разноименных зарядов Q, расположенных на расстоянии l друг от друга. Момент пары сил, действующий со стороны поля на элементарный диполь, равен:

$$\vec{M}_d = \vec{d} \times \vec{H}, \quad (3)$$

где $\vec{d}$ — элементарный дипольный момент.

$$\vec{d} = |Q|\vec{l}, \quad (4)$$

где $\vec{l}$ — плечо диполя — вектор, проведенный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между зарядами l.

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ связан с вектором намагниченности $\vec{M}$, характеризующим с макроскопической точки зрения упорядоченное распределение в теле магнитных диполей:

$$\vec{B} = \mu_0\left(\vec{H} + \vec{M}\right). \quad (5)$$

При малых значениях намагниченности он прямо пропорционален напряженности магнитного поля:

$$\vec{M} = \chi\vec{H}. \quad (6)$$

После преобразований:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (7)$$

где $\chi = \mu - 1$ — магнитная восприимчивость вещества; $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$Гн/м [11] — абсолютная магнитная проницаемость в вакууме; μ — относительная магнитная проницаемость.

Для магнитной восприимчивости вещества χ в работах [11–13] приводятся результаты экспериментальных исследований магнитно-реологической жидкости на основе керосина с различной концентрацией частиц магнетита в диапазоне $\chi \in [1{,}04; 9{,}20]$ при относительной концентрации $\varphi \in [0{,}211; 1]$.

Таким образом, входной параметр, определяющий поведение магнитно-реологической жидкости, — это напряженность магнитного поля $\vec{H}$, которая создается катушкой, намотанной на элемент звена переменной длины. Напряженность поля — кусочно-заданная ступенчатая функция. Магнитно-реологические жидкости намагничиваются в относительно малых магнитных полях $H \in [100; 100\,000]$ А/м.

Пусть магнитно-реологическая жидкость во время перемещения штока внутри корпуса звена (рис. 2) реализует простое сдвиговое течение с градиентом скорости $\dot{\gamma}$, а напряженность внешнего магнитного поля $\vec{H}$ направлена под углом ψ к градиенту скорости течения. Предположим, что магнитные частицы имеют форму эллипсоидов с отношением двух полуосей $\frac{a}{b} = 2$ и $b = c$.

Напряженность магнитно-реологической жидкости может быть оценена по результатам, полученным в работах [12–14]:

$$\begin{gathered}\sigma = \sigma_s + \sigma_a,\\ \sigma_a = \frac{\varphi_L\Gamma_m}{2n_c\nu_L},\\ \sigma_s = n_f\dot{\gamma}\Big\{1 + \varphi_L + \Big[\alpha_n + \frac{1}{2}(\zeta_n + \beta_n\lambda_n) + \\ + \frac{1}{2}\beta_n\cos(2\theta_n) + (\chi_n - 2\beta_n\lambda_n)sin^2(\theta_n)\cos^2(\theta_n)\Big]\Big\}.\end{gathered} \quad (8)$$

Здесь σ_s — симметричная компонента напряжения; σ_a — антисимметричная компонента напряжения; φ_L — объемная доля микронных частиц, равная $\varphi_L = 0{,}0127$; n — число частиц в цепочке; n_c — максимальное число частиц в цепочке; α_n, …, λ_n — кинетические коэффициенты, приведенные в работах [12, 13]; Γ_m — магнитный момент, стремящийся выстроить цепочку частиц вдоль поля; ν_L— объем микронной частицы; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; n_f — вязкость магнитно-реологической жидкости; θ — угол между вектором, направленным вдоль прямой, соединяющей центры двух микронных частиц, и вектором напряженности внешнего магнитного поля.

Как видно из формулы (6), тензор напряжений магнитно-реологической жидкости в магнитном поле несимметричен. Симметричная часть напряжения зависит от вязкости магнитно-реологической жидкости. Направление и величина приложенного внешнего магнитного поля существенно влияют на значение вязкости магнитно-реологической жидкости. Коэффициент вязкости может быть меньше или больше начального значения в зависимости от направления приложенного поля и формы частиц. Данный коэффициент в магнитном поле меняется по двум причинам. Первая связана с заторможенностью вращения частиц в поле, что приводит к увеличению значения коэффициента. Вторая — ориентирующее влияние внешнего магнитного поля на взвешенные частицы. В зависимости от направления поля коэффициент вязкости может уменьшаться или увеличиваться. В качестве примера рассмотрим внешнее магнитное поле, которое приложено вдоль направления течения жидкости. Если ее магнитные частицы имеют форму вытянутых эллипсоидов, то вязкость уменьшается. Если же это сплюснутые эллипсоиды, вязкость увеличивается.

Магнитный момент Γ_m, стремящийся выстроить цепочку частиц вдоль поля, вычислим по формуле [12, 13]:

$$\Gamma_m = 2{,}25\mu_0 H^2 \nu_L (n-1)(\chi_f+1)\sin\theta\cos\theta. \quad (9)$$

Здесь ν_L — объем микронной частицы; $\nu_L = \pi d_L^3/6$; d_L — диаметр микронной частицы; $d_L = 1\times10^{-6}$ м; θ — угол между вектором, соединяющим центры двух микронных частиц, и вектором напряженности внешнего магнитного поля; χ_f — магнитная восприимчивость несущей феррожидкости (примем, что она постоянна и всегда равна начальному значению $\chi_f = 3{,}05$).

Результаты исследования. Построим график магнитного момента Γ_m от напряженности магнитного поля H и угла θ.

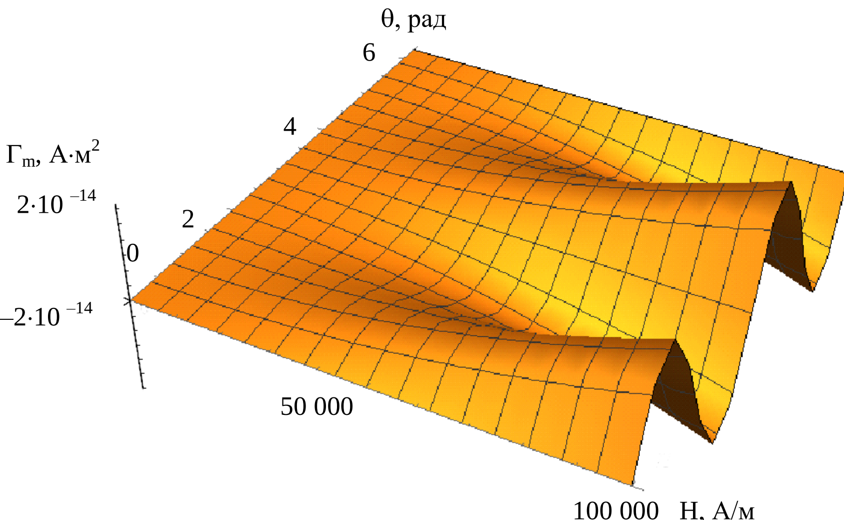


Рис. 3. Зависимость магнитного момента Γ_m от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

По рис. 3 можно судить о поведении магнитного момента Γ_m при различных значениях напряженности магнитного поля и углах между полем и диполями, оценить антисимметричную часть напряжения σ_a. Используя формулы (8) и (9), получим:

$$\sigma_a = \frac{\varphi_L 2{,}25\mu_0 H^2 \nu_L (n-1)(\chi_f+1)\sin\theta\cos\theta}{2n_c}. \quad (10)$$

Учитывая работы [12–14], в результате решения уравнения при $H = 10^5$ А/м, получим $n_c \approx 60$. Вязкость магнитно-реологической жидкости примем равной $n_f = 1{,}36$ Па · с [11].

Результаты расчетов антисимметричной части напряжения в графическом виде представлены на рис. 4.

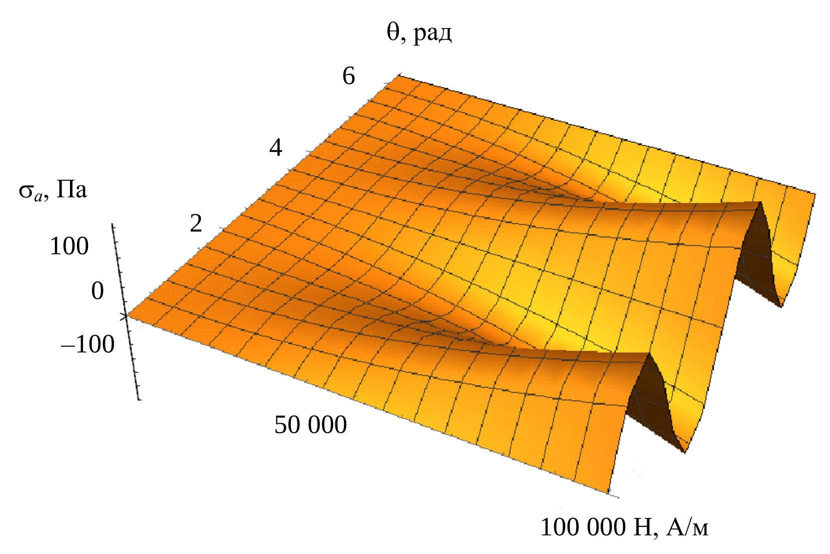


Рис. 4. Зависимость антисимметричной части напряжения σ_a от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

График показывает, что с увеличением напряженности приложенного внешнего магнитного поля напряженность магнитно-реологической жидкости монотонно увеличивается с учетом угла θ. Зависимость σ_a от угла θ показывает, что напряженность магнитно-реологической жидкости достигает:

– максимальных значений при углах, кратных $\frac{\pi}{4}$;

Механика

– нулевых значений при углах, кратных $\frac{\pi}{2}$.

Рассмотрим симметричную часть напряжения σ_s. В (8) для него есть кинетические коэффициенты. Вычислим их по выражениям из работ [12, 13], где они показаны в аналитическом виде. Число частиц в цепочке примем равным $n = 30$ как среднее арифметическое, исходя из оценки максимального количества частиц. Определим качественно, в первом приближении скорость сдвига $\dot{\gamma}$ между внешним слоем жидкости около стенки корпуса звена и внутренним слоем около штока. При этом будем исходить из требований, предъявляемых к конструкции звена экзоскелета для модели голени человека. В данном случае речь идет о максимальном значении скорости изменения длины голени человека, с которой должно синхронно работать звено экзоскелета. Согласно [15] скорость изменения длины голени $\dot{l} =$ 0,6 м/с. Расстояние между корпусом и штоком звена предполагается равным d = 0,01 м. Тогда скорость сдвига $\dot{\gamma} = 60\ c^{-1}$. Это не противоречит результатам других авторов: $\dot{\gamma} \in [0; 100]\ c^{-1}$. В дальнейшем такая оценка потребует уточнения на основе экспериментов, т. к. в литературных источниках не обнаружены решения или результаты экспериментов, подходящие для моделирования экзоскелетов или антропоморфных роботов.

Результаты расчетов симметричной части напряжения представлены в графическом виде на рис. 5.

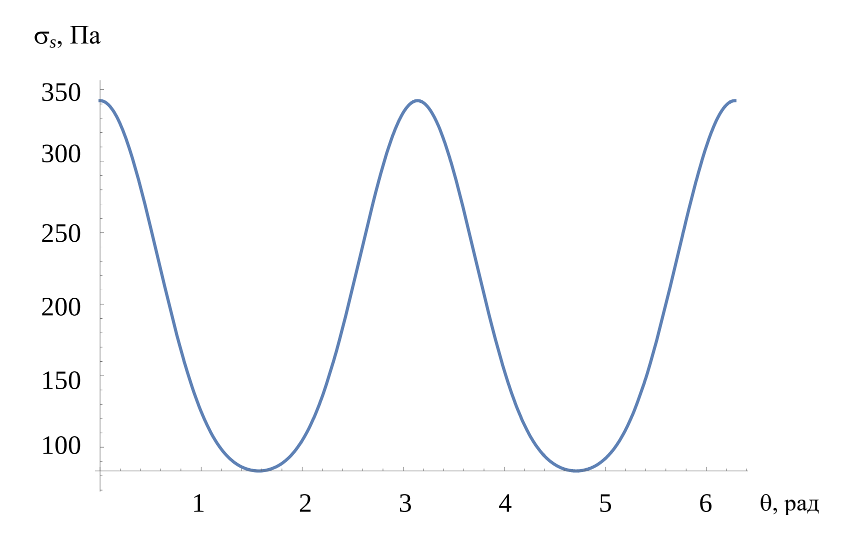


Рис. 5. Зависимость симметричной части напряжения σ_s от угла θ (рисунок авторов)

Напряженность магнитно-реологической жидкости как сумма симметричной и антисимметричной частей представлена на рис. 6. Ее сечение при фиксированном значении напряженности магнитного поля — на рис. 7.

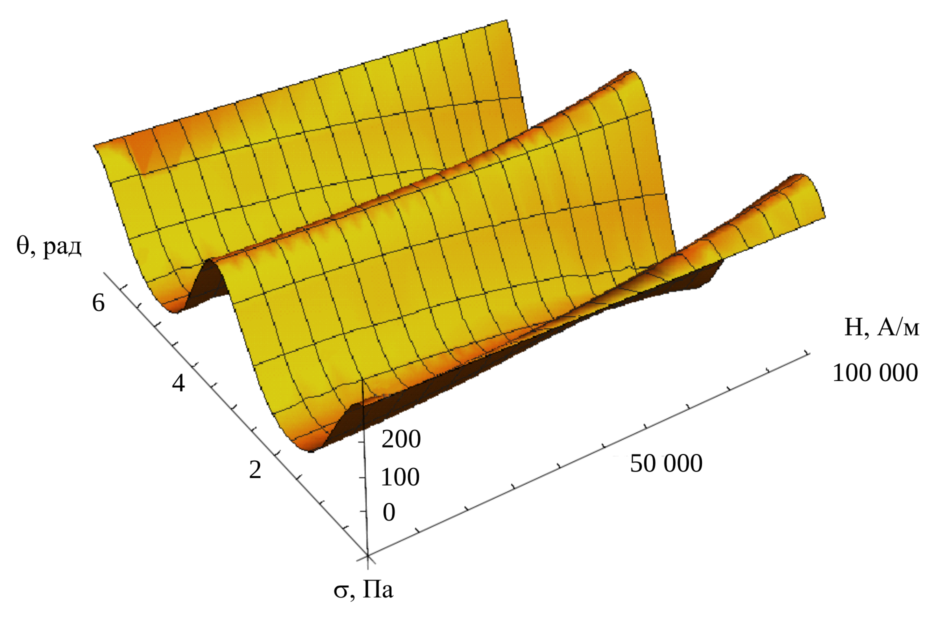


Рис. 6. Зависимость напряжения σ от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

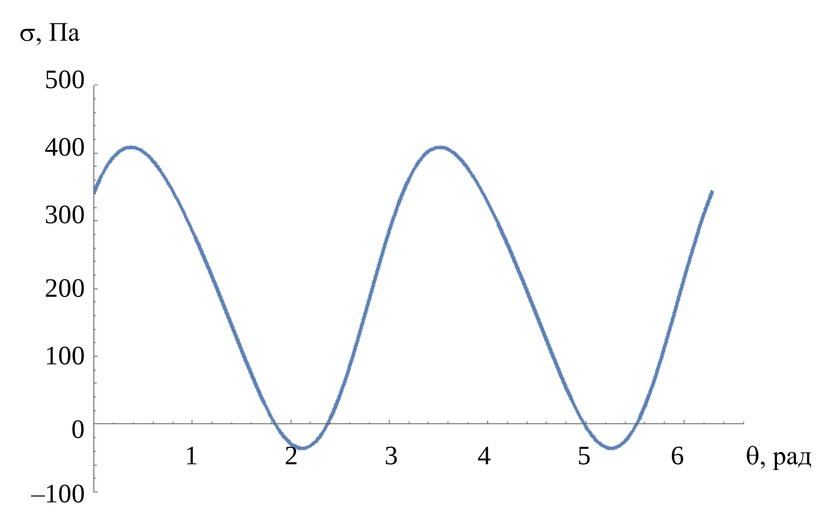


Рис. 7. Зависимость напряжения σ от угла θ при фиксированном значении напряженности магнитного поля $H = 10^5$ А/м (рисунок авторов)

Максимальное значение $\sigma_{max} = 408{,}6$ Па достигается при $\theta = 0{,}37$ рад. Таким образом, для управления свойствами магнитно-реологической жидкости необходимо менять угол между напряженностью внешнего магнитного поля и вектором ориентации между диполями. Также необходимо менять напряженность внешнего магнитного поля.

Внутренний диаметр корпуса, в котором расположен шток, примем равным $D = 0{,}2$ м. В первом приближении предположим, что вычисленные напряжения являются нормальными. Теперь можно определить силу, с которой действует магнитно-реологическая жидкость в звене переменной длины с регулируемой жесткостью:

$$F_{mrf} = \sigma A = \frac{\sigma \pi D^2}{4}. \quad (11)$$

На рис. 9 представлен график, построенный при фиксированном значении напряженности магнитного поля H для двух управляющих параметров: H и угла θ (рис. 8).

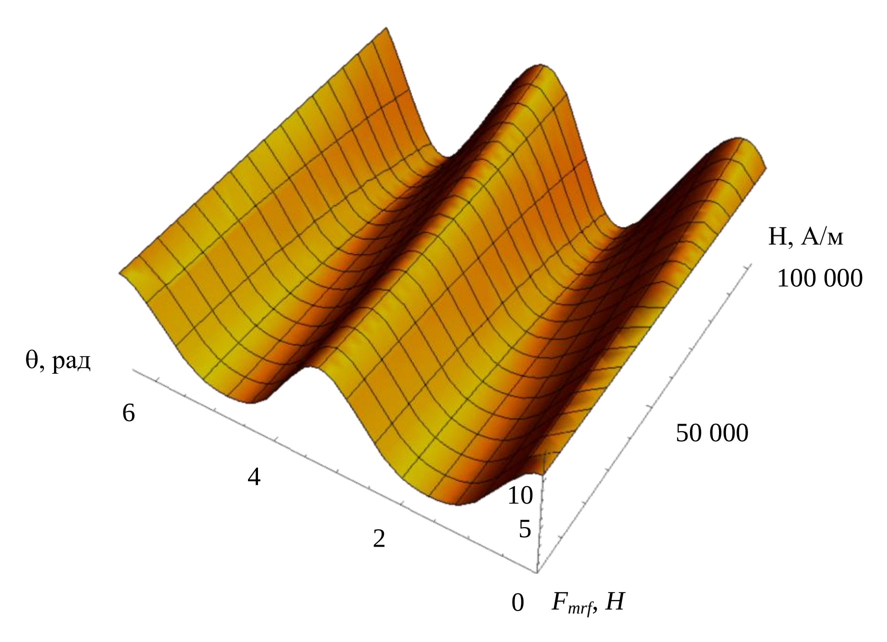


Рис. 8. Зависимость силы F_{mrf} от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

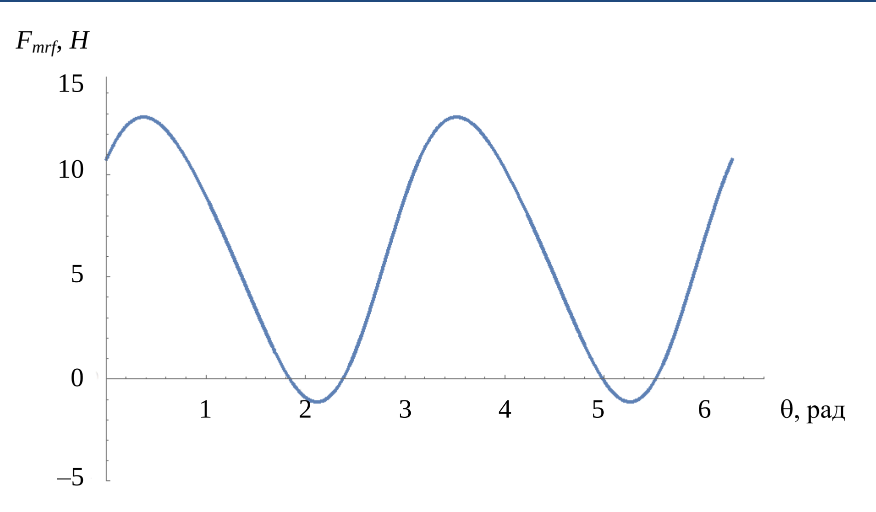


Рис. 9. Зависимость силы F_{mrf} от угла θ при фиксированном значении напряженности магнитного поля $H = 10^5$ А/м (рисунок авторов)

Максимальное значение $F_{mrf\,max} = 12{,}8$ Н достигается при θ = 0,37 рад. Это соответствует значениям, при которых, согласно [14], функционирует звено экзоскелета. Для дальнейшего увеличения силы со стороны магнитно-реологической жидкости необходимо повысить напряженность внешнего магнитного поля.

Итак, чтобы частицы ориентировались вдоль линий поля требуемым образом, нужно приложить магнитное поле соответствующей напряженности и ориентации.

Обсуждение и заключения. Итоги научных изысканий позволяют предложить метод управляющего воздействия внешнего магнитного поля на свойства магнитно-реологической жидкости. Впервые предложена модель звена переменной длины экзоскелета с регулируемой жесткостью, которая функционирует благодаря магнитно-реологической среде. Концепцию можно использовать для создания:

– комфортных экзоскелетов со звеньями переменной длины, шарнирами и связями;

– скафандров и аналогичного специального снаряжения;

– транспортных систем в виде антропоморфных роботов, обеспечивающих удобное перемещение в условиях пересеченной местности.

Широкое применение антропоморфных робототехнических систем нового поколения (биомехатронных моделей, синхронизированных с движениями опорно-двигательного аппарата человека) решит важные социальные и экономические задачи:

– повысит качество жизни людей с ограниченными двигательными возможностями;

– будет способствовать развитию высоких технологий в различных отраслях отечественной промышленности.

Список литературы

1. Borisov, A. V. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons / A. V. Borisov, I. E. Kaspirovich, R. G. Mukharlyamov // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2021. — Vol. 60. — P. 827–841. https://doi.org/10.1134/S106423072104002X

2. Bougrinat, Y. Design and Development of a Lightweight Ankle Exoskeleton for Human Walking Augmentation / Y. Bougrinat, S. Achiche, M. Raison // Mechatronics. — 2019. — Vol. 64. — Art. 102297. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.102297

3. Jinzhou Chen. Design, Testing and Control of a Magnetorheological Actuator for Assistive Knee Braces / Jinzhou Chen, Wei-Hsin Liao // Smart Materials and Structures. — 2010. — Vol. 19. — Art. 035029. 10.1088/0964-1726/19/3/035029

4. Carlson, J. Magnetorheological Fluid Actuators / J. Carlson // In book: Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications / Hartmut Janocha (ed.) — Saarbrücken : Springer, 1999. — P. 180–195.

5. Ahmadkhanlou, F. A Magnetorheological Fluid-Based Controllable Active Knee Brace / F. Ahmadkhanlou, J. L. Zite, G. N. Washington // Proceedings SPIE. — 2007. — Vol. 6527. — Art. 652700. https://doi.org/10.1117/12.715902

6. Dollar, A. M. Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art / A. M. Dollar, H. Herr // IEEE Transactions on robotics. — 2008. — Vol. 24. — P. 144–158. 10.1109/TRO.2008.915453

7. Design and Control of a Polycentric Knee Exoskeleton Using an Electro-Hydraulic Actuator / Taesik Lee, Dongyoung Lee, Buchun Song, Yoon Su Baek // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — P. 211. https://doi.org/10.3390/s20010211

8. Laflamme, S. Online Learning Algorithm for Structural Control Using Magnetorheological Actuators / S. Laflamme. — Massachusetts : Institute of Technology, 2007. — 88 p. — URL: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39271/170931934-MIT.pdf?sequence=2

9. A Kinematic Model of a Humanoid Lower Limb Exoskeleton with Hydraulic Actuators / S. Glowinski, T. Krzyzynski, A. Bryndal, I. Maciejewski // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — P. 6116. https://doi.org/10.3390/s20216116

10. Юсупбеков, Х. А. Активные подвески автомобиля с амортизаторами переменной жесткости / Х. А. Юсупбеков, М. М. Собиров, А. Р. Юлдашев // Наука, техника и образование. — 2020. — № 2 (66). — С. 18–27.

11. Lebedev, A. V. Viscosity of Magnetic Fluids Must Be Modified in Calculations of Dynamic Susceptibility / A. V. Lebedev // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2017. — Vol. 431. — P. 30–32. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.110

12. Зубарев, А. Ю. К нелинейной реологии магнитных жидкостей / А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Искакова, Д. Н. Чириков // Коллоидный журнал. — 2011. — Т. 73, № 3. — С. 320–333.

13. Зубарев, А. Ю. Магнитореологические свойства феррожидкостей с кластерными частицами / А. Ю. Зубарев, Д. Н. Чириков // Коллоидный журнал. — 2013. — Т. 75, № 5. — С. 567–576.

14. Applying the Models of Magneto-Rheological Substances in the Study of Exoskeleton Variable-Length Link with Adjustable Stiffness / A. Blinov, A. Borisov, L. Konchina, M. Novikova // Journal of Applied Informatics. — 2022. — Vol. 17. — P. 133–142. https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142

15. Borisov, A. V. Mathematical Models of Exoskeleton. Dynamics, Strength, Control / A. V. Borisov, A. V. Chigarev. — Cham : Springer, 2022. — 232 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97733-7

Поступила в редакцию 19.09.2022.
Поступила после рецензирования 20.10.2022.
Принята к публикации 20.10.2022.

Об авторах:

Блинов Александр Олегович, ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), ORCID, alex-blinov67@yandex.ru

Борисов Андрей Валерьевич, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), доктор физико-математических наук, доцент, ScopusID, ORCID, BorisowAndrej@yandex.ru

Кончина Лариса Владимировна, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID, la_kon@mail.ru

Новикова Марина Александровна, старший преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), ORCID, mar.novikova@ro.ru

Чигарев Анатолий Власович, профессор механико-математического факультета Белорусского государственного университета (220030, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 4), доктор физико-математических наук, профессор, ORCID, chigarevanatoli@yandex.by

Заявленный вклад соавторов:

А. О. Блинов — постановка цели и задачи исследования, проведение расчетов, построение графиков, подготовка текста, формулирование выводов. А. В. Борисов — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Л. В. Кончина — составление системы дифференциальных уравнений в частных производных и запись соотношений, определяющих поведение магнитно-реологической жидкости. М. А. Новикова — графическое изображение звена экзоскелета переменной длины с регулируемой жесткостью и его функционирования, подбор численных параметров модели. А. В. Чигарев — формирование основной концепции, участие в анализе результатов и подготовке выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 539.42
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-306-314

Научная статья



Расчет на прочность зоны сопряжения плиты перекрытия и колонны монолитного железобетонного каркаса методом конечных элементов

П. П. Гайджуров, **В. А. Володин**
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
gpp-161@yandex.ru

Аннотация

Введение. При конечно-элементном моделировании высотных зданий из монолитного железобетона, как правило, используется рамно-стержневая расчетная схема. Данная модель не позволяет получить данные о распределении компонент тензора напряжений в зоне сопряжения перекрытия с колонной. Поэтому проблема совершенствования методики прочностного расчета в местах стыков перекрытий и колонн является актуальной. Целью настоящего исследования является разработка концепции фрагментации рамного каркаса для оценки несущей способности перекрытий. На тестовом примере шестипролетного трехэтажного монолитного железобетонного каркаса выполнены численные эксперименты с использованием объемно-стержневой и объемно-пластинчатой моделей повторяющегося конструктивного фрагмента. Разработаны практические рекомендации для уточненного прочностного расчета перекрытий монолитных железобетонных каркасов многоэтажных зданий.

Материалы и методы. Вычислительные эксперименты выполнены с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical, в котором реализован метод конечных элементов в форме метода перемещений. Для моделирования напряженно-деформированного состояния монолитного железобетонного каркаса применен пластинчато-стержневой ансамбль конечных элементов. Уточненный расчет зоны сопряжения перекрытия и колонны при статическом нагружении выполнен с использованием ансамблирования объемных, балочных, ферменных и пластинчатых элементов.

Результаты исследования. Разработана инженерная методика численного анализа напряженно-деформированного состояния зоны сопряжения перекрытия и колонны железобетонного монолитного каркаса при статическом нагружении. Наиболее точный результат обеспечила конечно-элементная модель, построенная с использованием балочных конечных элементов в качестве арматурных стержней.

Обсуждение и заключения. Разработанная методика численного моделирования сопряжения перекрытия и колонны позволила оценить реальный запас прочности данного узла с учетом реальной геометрии армирующих сеток, а также уточнить несущую способность монолитного железобетонного каркаса при различных сценариях нагружения.

Ключевые слова: метод конечных элементов; объемные, балочные, ферменные, пластинчатые конечные элементы; безригельное перекрытие с бескапительным стыком; модель сопряжения плиты перекрытия и колонны; модели дискретного армирования перекрытия.

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Гайджуров, П. П. Расчет на прочность зоны сопряжения плиты перекрытия и колонны монолитного железобетонного каркаса методом конечных элементов / П. П. Гайджуров, В. А. Володин // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 306–314. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-306-314

Original article

Strength Calculation of the Coupling of the Floor Slab and the Monolithic Reinforced Concrete Frame Column by the Finite Element Method

Peter P. Gaidzhurov ✉, **Victor A. Volodin**
Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ gpp-161@yandex.ru

Abstract
Introduction. The given model does not allow obtaining data on the distribution of the stress tensor components in the zone of intersection of the floor and the column. Therefore, the problem of improving the strength calculation technique at the joints of floors and columns is urgent. This study aims at developing the concept of fragmentation of the frame to assess the load-bearing capacity of the floors. As a rule, a frame-rod design scheme is used under the finite element modeling of high-rise buildings made of monolithic reinforced concrete. Numerical experiments using volume-rod and volume-plate models of a repeating structural fragment were performed on a test example of a six-span three-storey monolithic reinforced concrete frame. Practical recommendations have been developed for the refined strength calculation of the floors of monolithic reinforced concrete frames of multistorey buildings.
Materials and Methods. Computational experiments were performed using the ANSYS Mechanical software package, in which the finite element method was implemented in the form of a displacement method. A plate-rod ensemble of finite elements was used to simulate the stress-strain state of a monolithic reinforced concrete frame. The refined calculation of the coupling zone of the floor slab and column under static loading was performed using solid, beam, truss and plate elements.
Results. An engineering technique has been developed for numerical analysis of the stress-strain state of the coupling of the floor and the column of the reinforced concrete monolithic frame under static loading. The most accurate result was provided by a finite element model constructed using beam finite elements as reinforcing rods.
Discussion and Conclusions. The developed technique of numerical modeling of the coupling of the floor and the column made it possible to estimate the real strength margin of this node, taking into account the real geometry of reinforcing grids, as well as to clarify the bearing capacity of a monolithic reinforced concrete frame under various loading scenarios.

Keywords: finite element method; solid, beam, truss, plate finite elements; girderless floor with a capless joint; model of coupling of a floor slab and a column; models of discrete floor reinforcement.

Acknowledgements. The authors would like to thank the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions contributed to a significant improvement in the quality of this article.

For citation. P. P. Gaidzhurov, V. A. Volodin. Strength Calculation of the Coupling of the Floor Slab and the Monolithic Reinforced Concrete Frame Column by the Finite Element Method. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 306–314. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-306-314

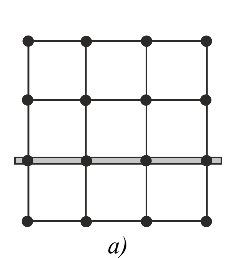
Введение. В настоящее время проектирование многоэтажных высотных зданий из монолитного железобетона базируется на рамно-связевой конструкционной схеме, позволяющей в известной степени обеспечить «живучесть» здания в случае прогрессирующего (лавинообразного) разрушения [1, 2]. Отметим, что в отечественной строительной науке под термином «прогрессирующее разрушение» понимается процесс обрушения несущих конструкций на нескольких этажах здания или на одном этаже площадью более 80 м ^{2}. Данное явление возникает в результате одномоментного разрушения, как правило, одного несущего элемента, с последующим быстро нарастающим обрушением всего здания или его части по сценарию «домино».

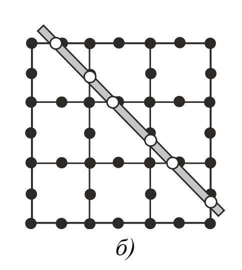
В качестве основных конструкционных элементов монолитных железобетонных каркасов многоэтажных зданий выступают повторяющиеся фрагменты колонн и безригельных перекрытий, связанных бескапительными стыками [1].

Несмотря на многолетний опыт проектирования зданий с рамно-связевыми каркасами, в мировой практике известны случаи прогрессирующего разрушения данных объектов. Причины таких явлений главным образом обусловлены ошибками при проектировании зоны сопряжения перекрытий и колонн в сочетании с нарушением установленных правил эксплуатации зданий. Целью настоящего исследования является разработка инженерной методики прочностного расчета рамного каркаса многоэтажного здания из монолитного железобетона с учетом объемного характера напряженного состояния в зоне стыка перекрытия и колонны.

При конечно-элементном моделировании изгибаемых железобетонных конструкций обычно используют подход, основанный на представлении бетона двумерными или трехмерными конечными элементами (КЭ), по-

строение которых базируется на принципах теории упругости. Армирующие стержни, как правило, моделируются балочными или ферменными КЭ соответствующей размерности. По способу ансамблирования объемных и стержневых КЭ различают следующие схемы представления армирования [2, 3]: дискретно-распределенное, при котором координаты узлов разнотипных элементов совпадают (рис. 1 *а*); армирование с использованием так называемых встроенных конечных элементов (рис. 1 *б*). В последнем случае координаты узлов разнотипных КЭ не совпадают и предусматривается процедура «конденсации» элементов матриц жесткости стержневого элемента на смежные узлы объемного (основного) элемента (рис. 1 *в*). Отметим, что вычислительная технология встроенных КЭ применима исключительно для решения задачи об обобщенном плоском напряженном состоянии. Причем основные КЭ должны быть изопараметрическими и поликвадратичными, а встроенные КЭ — прямолинейными ферменного типа (рис. 1 *в*).





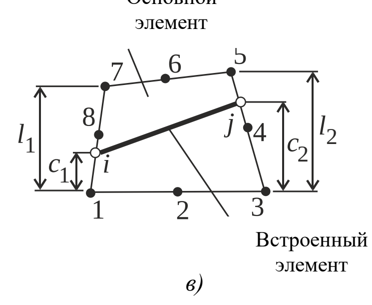


Рис. 1. Схемы моделирования армирования: *а* — дискретно-распределенная;
б — со встроенными стержневыми элементами; *в* — основным и встроенным элементами (рисунок авторов)

В российской практике прочностного расчета монолитных зданий и сооружений из железобетона преимущественно используются узко специализированные программные комплексы ЛИРА-САПР и SCAD-Office [4, 5], в которых для моделирования рамно-связевых каркасов применяется технология ансамблирования пластинчатых и балочных КЭ. При этом в зонах сопряжения перекрытий и колонн автоматически вводятся так называемые жесткие вставки, представляющие собой звездообразно расположенные балочные КЭ с искусственно завышенной изгибной жесткостью (рис. 2). Геометрия жесткой вставки соответствует поперечным размерам сечения колонны. Такой подход позволяет придать более физичный характер распределению изгибающих моментов в КЭ перекрытия.

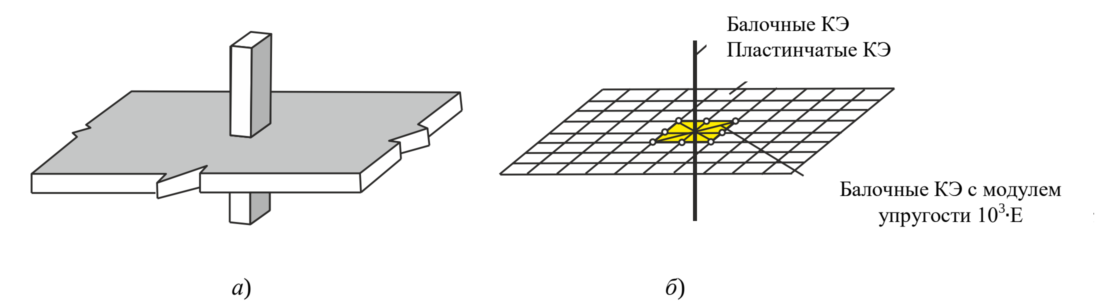


Рис. 2. Моделирование зоны сопряжения перекрытия и колонны:
а — зона сопряжения; *б* — расчетная схема зоны сопряжения с жесткой вставкой (рисунок авторов)

Альтернативой жестким вставкам с балочными КЭ с завышенной жесткостью является процедура коопрования (связывания) степеней свободы узлов пластинчатых элементов, примыкающих к узлу стержневого элемента, с соответствующими узловыми перемещениями и углами поворотов стержневых КЭ. Естественно, при таком подходе необходимо в местах сопряжений пластинчатых и стержневых КЭ предусмотреть сгущение сетки до размеров поперечных сечений колонн. Отметим, что рассмотренный подход также может быть программно автоматизирован.

Материалы и методы. В настоящее время разработчики конечно-элементных программных комплексов при построении матриц жесткости пластинчатых и оболочечных конечных элементов широко используют алгоритм MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components), базирующийся на процедуре независимой (раздельной) аппроксимации изгибных и сдвиговых деформаций. Цель данной процедуры состоит в исключении эффекта «заклинивания» или ложного сдвига.

Для моделирования колонн монолитных железобетонных каркасов применяют прямолинейные двухузловые балочные КЭ с шестью степенями свободы в узле, которые включают три перемещения в направлении локаль-

ных осей и соответствующие угловые перемещения.

В программном комплексе ANSYS Mechanical для расчета пространственных рамно-связевых каркасов предусмотрены пластинчатый четырехузловой КЭ SHELL63 и двухузловой балочный КЭ BEAM188[1]. Анализ трехмерного напряженно-деформированного состояния конструкций из железобетона выполняют с помощью специального восьмиузлового элемента SOLD65.

Результаты исследования. Выполним расчет напряженно-деформированного состояния монолитного трехэтажного железобетонного каркаса с шагом колонн 5×7 м. Высота этажа — 4,7 м; размер сечения колонны — 0,4×0,4 м; толщина перекрытия — 0,2 м. Модуль упругости, коэффициент Пуассона, удельный вес материалов перекрытий $E = 2{,}7\times10^4$ МПа; $\nu = 0{,}2$; $\gamma = 2440$ кг/м^3; колонн $E = 3\times10^4$ МПа; $\nu = 0{,}2$; $\gamma = 2500$ кг/м^3. Расчетные значения сопротивления бетона осевому сжатию и растяжению соответственно составляют: $R_b = 25{,}5$ МПа, $R_{bt} = 2{,}37$ МПа.

Полагаем, что на все перекрытия каркаса действует постоянная равномерно распределенная нагрузка $q = 2$ кПа. Расчеты выполняем с учетом собственного веса каркаса. Считаем, что основания колонн первого этажа каркаса жестко закреплены.

На первом этапе расчета перекрытия и колонны каркаса моделируем соответственно пластинчатыми SHELL63 и балочными BEAM188 КЭ.

В таблице 1 приведены результаты сравнительных расчетов перекрытия первого этажа каркаса. Вычисления проводились с шагом сетки на перекрытиях 0,2 м и 0,5 м. Колонны в обоих случаях разбивались на 6 КЭ. В таблице 1 и далее обозначено: u_z — максимальный прогиб; M_x, M_y — изгибающие моменты относительно глобальных осей. В третьей строке таблицы 1 приведены данные расчета каркаса с жесткими вставками (шаг сетки 0,2 м). Жесткие вставки с размерами сторон 0,4×0,4 м моделировались пластинчатыми КЭ SHELL63 с модулем упругости $10^3\times E$.

Отметим, что значения $M_{x\,max}$, $M_{y\,max}$, приведенные в таблице 1, относятся к небольшим локальным зонам сопряжения колонн и перекрытий. Величины $M_{x\,min}$ и $M_{y\,min}$ распространяются по периметру каркаса между рядами крайних колонн.

Аналогичный расчет каркаса был выполнен с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР. Значение максимального прогиба на первом этаже при аналогичном нагружении и механических постоянных материала, полученное с помощью программного комплекса ЛИРА САПР, составило $u_z = -3{,}06$ мм, что сопоставимо с расчетом в ANSYS $u_z = -3{,}49$ мм при шаге сетки на перекрытиях $0{,}2^*$ (таблица 1). При расчете с использованием комплекса ЛИРА-САПР на шаге построения «аналитической модели» в точках пересечения колонн и перекрытий включались «контуры продавливания», опосредованно влияющие на изгибную жесткость перекрытий в сторону ее увеличения.

Таблица 1

Значения экстремальных изгибающих моментов в зоне сопряжения перекрытия первого этажа и колонны при использовании SHELL63

Шаг сетки, м	Число неизвестных	u_z, м	M_X, кН·м		M_Y, кН·м	
			min	*max*	*min*	*max*
0,5	103032	–0,004908	–13,1	37,2	–20,6	45,3
0,2	583200	–0,005409	–15,2	70,2	–22,5	99,7
$0{,}2^*$	583200	–0,003492	–10,8	106	–17,5	106

В таблице 2 приведены значения экстремальных изгибающих моментов для перекрытия первого этажа, полученные с помощью ANSYS (шаг сетки $0{,}2^*$ м) и ЛИРА-САПР (шаг сетки 0,395 м). Следует отметить, что в комплексе ЛИРА-САПР для количественной оценки значений M_x и M_y введена шкала погонных изгибающих моментов, т. е. результирующие моменты приведены к полосе плиты шириной 1 м.

[1] Басов К. А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

Таблица 2

Сравнение экстремальных значений изгибающих моментов в зоне сопряжения перекрытия первого этажа и колонны, вычисленных с помощью ANSYS и ЛИРА-САПР

Программный комплекс	M_x, кН·м		M_y, кН·м	
	min	*max*	*min*	*max*
ANSYS	–10,8	106	–17,5	106
ЛИРА-САПР	–31,5	8,37	–42,2	12,9

Из представленных в таблице 2 данных видно, что полученные с использованием ANSYS и ЛИРА-САПР одноименные экстремальные моменты существенно различаются по величине. Данное обстоятельство объясняется наличием в исследуемой конечно-элементной модели локальных зон концентрации внутренних усилий в местах сопряжения пластинчатых и стержневых КЭ. Причем принятые размеры пластинчатых КЭ в обоих комплексах не позволяют точно смоделировать градиенты изменения изгибающих моментов в указанных зонах концентрации.

Анализируя результаты расчета каркаса по пластинчато-стержневой схеме приходим к выводу, что данная модель не позволяет исследовать детальную картину напряженного состояния конструкции. В частности, не удается проанализировать зоны растягивающих нормальных напряжений σ_x, σ_y σ_z, возникающих в местах сопряжения колонн и перекрытий. В этой связи актуальной является задача построения расчетной модели повторяющегося фрагмента каркаса, позволяющей выполнить численное исследование объемного напряженно-деформированного состояния, в том числе с учетом армирования. На рис. 3 изображен план перекрытия рассматриваемого каркаса с выделенными повторяющимися фрагментами *a*, *b*, *c*. Область повторяющегося фрагмента *a* является объектом дальнейшего исследования.

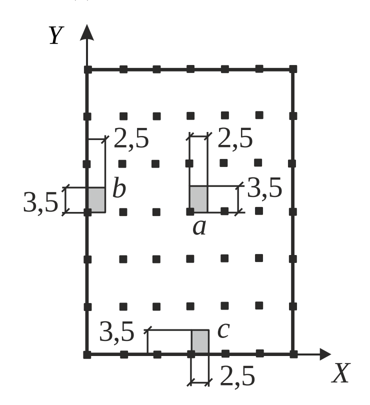


Рис. 3. Повторяющиеся фрагменты *a*, *b*, *c* перекрытия каркаса (рисунок авторов)

Для моделирования объемного напряженно-деформированного состояния повторяющегося фрагмента применим восьмиузловой КЭ типа SOLID185 с тремя степенями свободы в узле.

На рис. 4 представлена расчетная схема повторяющегося фрагмента *a* рассматриваемого каркаса. Приведенная расчетная схема относится к первому этажу каркаса. Здесь сосредоточенная сила *P* =72,6 кН взята из эпюры продольных сил, полученной с использованием пластинчато-стержневой модели каркаса. При этом сосредоточенную силу *P* преобразуем к статически эквивалентному давлению $q_к$ = 453,5 кПа, действующему на площадке 0,2×0,2 м (1⁄4 часть сечения колонны). Статические граничные условия $\overline{u}_X$, $\overline{u}_Y$, $\overline{u}_Z$ накладываются на узлы КЭ с учетом циклической симметрии картины деформации перекрытия. Соответствующая конечно-элементная модель фрагмента, построенная на базе объемных КЭ типа SOLID185, приведена на рис. 5. В данном случае шаг сетки объемных КЭ принят равным 0,1 м. Давление на фрагмент перекрытия и 1/4 части колонны прикладываем с помощью элемента SURF154[2].

Результаты сравнения жесткостных свойств пластинчато-стержневой и объемной конечно-элементных моделей рассматриваемого фрагмента каркаса в виде картин распределения перемещений u_Z приведены на рис. 6. Картины распределения u_Z на рис. 6 *б* и рис. 6 *в* соответствуют расчетам фрагмента с учетом и без учета силы *P*. Как видно из представленных результатов, расчет без учета силы *P* (рис. 6 *в*) дает значения переме-

[2] То же.

щений, наиболее близкие к данным пластинчато-стержневой модели. Дальнейшие численные эксперименты будем проводить с учетом нагружения колонны фрагмента давлением $q_к$.

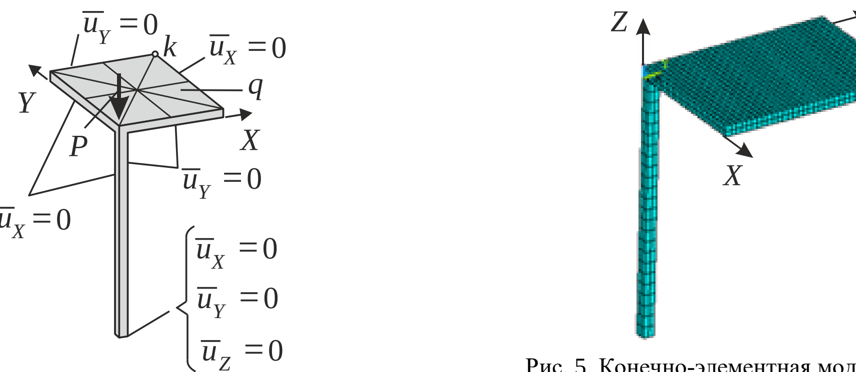


Рис. 4. Расчетная схема фрагмента (рисунок авторов)

Рис. 5. Конечно-элементная модель фрагмента (рисунок авторов)

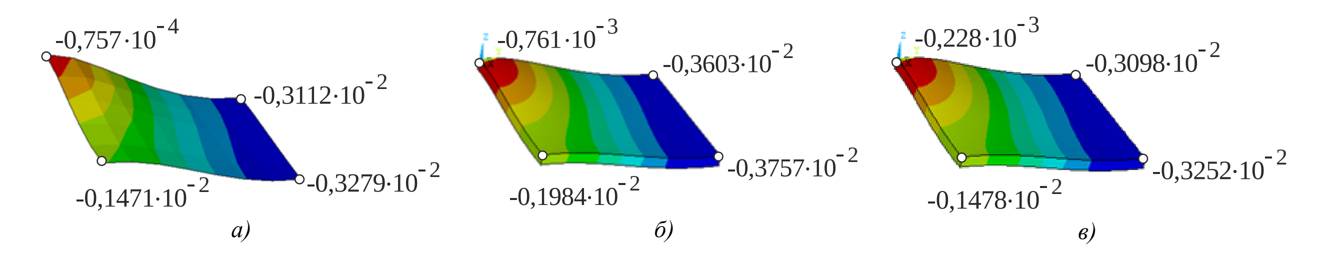


Рис. 6. Результаты вычисления перемещений u_Z по двум моделям: *а* — пластинчато-стержневая модель; *б* — объемная модель с учетом силы *P*; *в* — объемная модель без учета силы *P* (рисунок авторов)

Выполним исследование влияния армирования на напряженно-деформированное состояние рассматриваемого фрагмента каркаса. Считаем, что перекрытия каркаса безригельные и бескапительные. Рассмотрим три схемы моделирования армирования части перекрытия, принадлежащей фрагменту: 1 — дискретное армирование с использованием стержневых КЭ (BEAM188); 2 — дискретное армирование с использованием ферменных КЭ (LINK180); 3 — распределенное армирование с использованием пластинчатых КЭ (SHELL63). Следует отметить, что моделирование арматуры посредством ферменных КЭ также подходит для расчета преднапряженных железобетонных конструкций[3] [1, 6, 7].

Конструктивные элементы дискретного армирования фрагмента каркаса продемонстрированы на рис. 7. Материал армирующих стержней — сталь ($E = 2\times10^5$ МПа; $\nu = 0{,}28$; $\gamma = 7800$ кг/м^3).

Армирующие сетки выполнены из стержней следующего диаметра: фоновое армирование (по всей плоскости перекрытия) — 10 мм; армирование ригелей — 12 мм; армирование капители — 16 мм. Диаметры стержней для поперечного армирования ригелей и капителей имеют значения, аналогичные вышеприведенным. Армирующие стержни колонны диаметром 12 мм расположены по углам сечения.

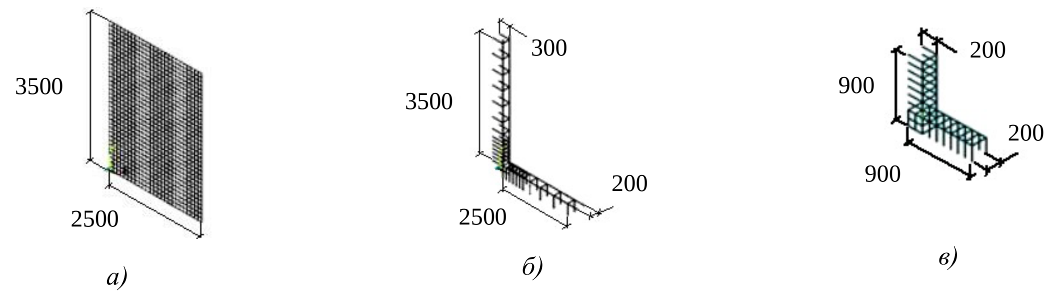
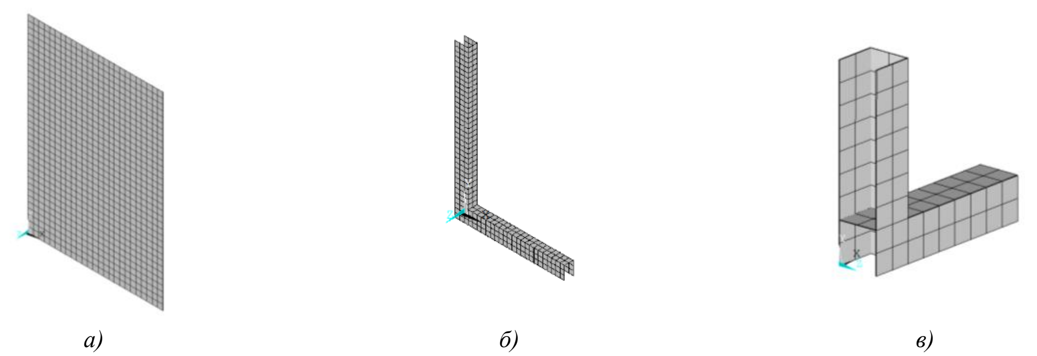


Рис. 7. Конструктивные элементы дискретного армирования: *а* — фоновое верхнее ⁄ нижнее армирование; *б* — армирование ригелей; *в* — армирование капители (рисунок авторов)

[3] СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М., 2004. 59 с.

Назначенные значения диаметров армирующих стержней взяты на основании прототипа [8–10]. Для моделирования арматуры используем балочные или ферменные КЭ.

Альтернативой модели дискретного армирования является подход, базирующийся на принципе «размазывания», так называемая модель распределенного армирования. Суть принципа «размазывания» в общем случае состоит в введении приведенного модуля упругости, являющегося функцией от модулей упругости компонентов неоднородного материала и их объемных концентраций. Однако расчетная практика [1] показала, что для железобетонных конструкций, работающих на изгиб, более реалистичные результаты дает введение дискретных армирующих слоев, эквивалентных объему, занимаемому армирующими стержнями. Геометрия таких слоев повторяет геометрию армирующих сеток. Для рассматриваемого фрагмента каркаса на рис. 8 показаны эквивалентные армирующие слои, моделируемые пластинчатыми КЭ типа SHELL63.



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Эквивалентные армирующие слои: *а* — слой для фонового армирования (верхнего ⁄ нижнего); *б* — слои армирования ригелей; *в* — слои армирования капители (рисунок авторов)

На основании условия равенства объемов армирующих элементов и совпадения геометрии зон армирования получим следующие толщины для эквивалентных армирующих слоев: слой фонового армирования — 1,6 мм; слои армирования ригелей — 1,1 мм, 0,74 мм, 1,2 мм, 0,78 мм; слои армирования капители — 5 мм, 2,7 мм.

В процессе вычислительного эксперимента исследовалась зависимость прогиба u_z в точке *k* и максимальных растягивающих напряжений $\sigma^+_{x\,max}$, $\sigma^+_{y\,max}$, $\sigma^+_{z\,max}$ от принятой схемы армирования исследуемого фрагмента (рис. 4). В таблице 3 приведены результаты расчетов.

Таблица 3

Значения прогибов и напряжений при различных способах моделирования арматуры

Моделирование арматуры	u_z в точке *k*, мм	$\sigma^+_{x\,max}$, МПа	$\sigma^+_{y\,max}$, МПа	$\sigma^+_{z\,max}$, МПа
Без арматуры	–3,32	3,26	4,40	1,44
BEAM188	–2,81	2,77	3,76	1,08
LINK180	–2,92	2,75	3,74	1,06
SHELL63	–2,06	1,19	1,74	0,513

Анализ результатов показал, что применение пластинчатых КЭ приводит к существенному занижению максимальных растягивающих напряжений. Данные, полученные с использованием балочных и ферменных КЭ, практически совпадают, что объясняется низкой изгибной жесткостью армирующих стержней.

Важно подчеркнуть, что для рассмотренного варианта нагружения при использовании стержневых КЭ (BEAM188 и LINK180) в зоне сопряжения колонны и перекрытия условие прочности для напряжений $\sigma^+_{x\,max}$ и $\sigma^+_{y\,max}$ не выполняется.

На рис. 9 приведена визуализация процесса трещинообразования в плите перекрытия, полученная при моделировании бетона объемными восьмиузловыми КЭ SOLIDS65. Следует отметить, что в перекрытии появляются только микротрещины, граница которых хорошо согласуется с полем напряжений сдвига σ_{xy} в плоскости перекрытия (рис. 10).

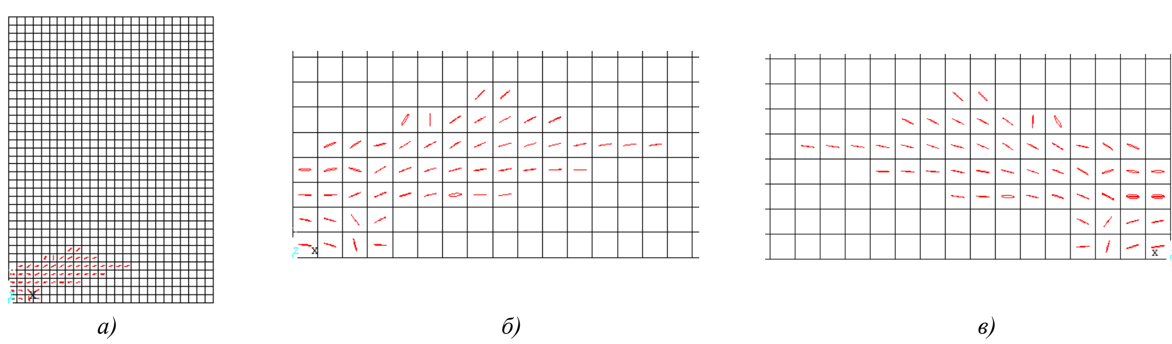


Рис. 9. Визуализация процесса трещинообразования в плите перекрытия: *а* — общий вид фрагмента; *б* — вид зоны трещинообразования сверху; *в* — вид зоны трещинообразования снизу (рисунок авторов)

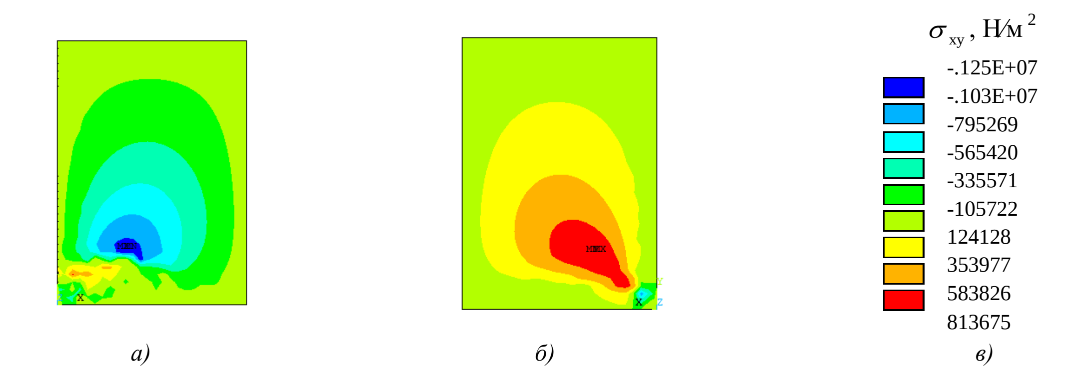


Рис. 10. Картина распределения напряжений σ_{xy} в перекрытии:
а — вид фрагмента сверху; *б* — вид фрагмента снизу; *в* — шкала напряжений (рисунок авторов)

Для моделирования физической нелинейности бетона использовалась модель Уиллама-Варнке [11] со следующими параметрами: коэффициент передачи сдвиговых усилий при открытой трещине — 0,3; коэффициент передачи сдвиговых усилий при закрытой трещине — 0,7; коэффициент понижения жесткости при образовании трещины в результате растяжения — 0,6.

Обсуждение и заключения

1. На основании выполненного линейно-упругого расчета монолитного каркаса из железобетона доказано, что пластинчато-стержневая модель, широко используемая в практике проектирования, не позволяет количественно оценить величины растягивающих нормальных напряжений в зонах сопряжения плит перекрытий и колонн.

2. Разработана методика численного моделирования объемного напряженно-деформированного состояния в месте сопряжения перекрытия и колонны монолитного железобетонного каркаса, позволяющая оценить фактический запас прочности данного узла, а также уточнить несущую способность соответствующего здания или сооружения при различных сценариях нагружения.

Список литературы

1. Merritt, F. S. Building Design and Construction Handbook / Frederick S. Merritt, Jonathan T. Ricketts. — McGraw Hill Professional, 2000. — 1600 p.

2. Wolanski, A. J. Flexural Behavior of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis /A. J. Wolanski. — Marquette University, Milwaukee; 2004. — 87 p.

3. Hyo-Gyoung Kwak, Filippou F. C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures under Monotonic Loads / Hyo-Gyoung Kwak, F. C. Filippou. — University of California, 1990. — 124 p.

4. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона (проблемы, опыт, решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии) / А. С. Городецкий, Л. Г. Батрак, Д. А. Городецкий. — Киев : Факт, 2004. — 106 с.

5. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа : практическое руководство / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. — Москва : ДМК Пресс, 2009. — 596 с. (Серия «Проектирование»). URL: https://znanium.com/read?id=418879 (дата обращения: 14.09.2022).

6. Самохвалова, Е. О. Стык колонны с безбалочным бескапительным перекрытием в монолитном здании / Е. О. Самохвалова, А. Д. Иванов // Инженерно-строительный журнал. — 2009. — № 3. — С. 33–37.

7. FIP Handbook on Practical Design: Examples of the Design of Concrete Structures. — Thomas Telford Limited, London; 2010. — 188 p.

8. Лукин, А. В. Конечно-элементное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций / А. В. Лукин, В. С. Модестов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2014. — № 3 (201). — С. 35–46.

9. Гайджуров, П. П. Конечно-элементное моделирование передачи усилия натяжения стального каната на бетон / П. П. Гайджуров, Аль-Джабоби Сами Фахль, Аль-Хадж Махмуд Абдо Хаса // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 73–78.

10. Определение выгиба большепролетных железобетонных балок от преднапряжения арматуры методом конечных элементов / П. П. Гайджуров, Э. Р. Исхакова, Аль-Джабоби Сами Фахль, Аль-Хадж Махмуд Абдо Хаса // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 4. — С. 86–91.

11. Карпенко, Н. И. Общие модели железобетона / Н. И. Карпенко. — Москва : Стройиздат, 1996. — 416 с.

Поступила в редакцию 31.10.2022.
Поступила после рецензирования 22.11.2022.
Принята к публикации 23.11.2022.

Об авторах:

Гайджуров Петр Павлович, профессор кафедры «Техническая механика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, ORCID, gpp-161@yandex.ru

Володин Виктор Александрович, аспирант кафедры «Техническая механика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, vik25vol@bk.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. П. Гайджуров — постановка задачи, выбор метода решения, построение математической и компьютерной модели, обсуждение результатов. В. А. Володин — критический обзор литературных источников по теме исследования, проведение расчетов, обсуждение результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 624.04:531.391.3
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-315-322

Научная статья



Аналитическая оценка частоты собственных колебаний плоской решетки

М. Н. Кирсанов
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

Аннотация

Введение. Предлагается новая схема плоской статически определимой регулярной решетки. Стержни решетки соединены шарнирами. Цель исследования — вывести формулу зависимости от числа панелей первой частоты собственных колебаний узлов, наделенных массами, каждая из которых имеет две степени свободы в плоскости решетки. Жесткость всех стержней принята одинаковой, опоры (подвижный и неподвижный шарниры) недеформируемыми. Другая цель исследования — найти в аналитической форме зависимость усилий в наиболее сжатых и растянутых стержнях от числа панелей.

Материалы и методы. Используется приближенный метод Донкерлея определения нижней оценки собственной частоты колебаний решетки. Жесткость решетки находится в аналитической форме по формуле Максвелла — Мора. Усилия в стержнях и реакции опор определяются из уравнений равновесия, составленных для всех узлов решетки. Обобщение результата на произвольное число панелей выполняется методом индукции с применением операторов символьной математики Maple по аналитическим решениям ряда задач для решеток с различным числом панелей.

Результаты исследования. Нижняя аналитическая оценка первой частоты колебаний хорошо согласуется с численным решением для минимальной частоты спектра колебаний конструкции. Найдены формулы для усилий в четырех наиболее сжатых и растянутых стержнях и их линейные асимптотики. Все необходимые преобразования производятся в системе символьной математики Maple.

Обсуждение и заключения. Полученная зависимость первой частоты колебаний решетки от числа панелей, массы и размеров конструкции имеет компактную форму и может быть использована как тестовая задача для численных решений и при оптимизации конструкции.

Ключевые слова: решетка, собственная частота, оценка Донкерлея, индукция, формула Максвелла-Мора, Maple, нижняя оценка частоты, аналитическое решение, усилия в стержнях, асимптотика.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках проекта № 22–21–00473 при поддержке Российского научного фонда.

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Кирсанов, М. Н. Аналитическая оценка частоты собственных колебаний плоской решетки / М. Н. Кирсанов // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 315–322. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-315-322

Original article

Analytical Estimation of the Natural Oscillation Frequency of a Planar Lattice

M. N. Kirsanov

National Research University (MPEI), 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, Russian Federation

Abstract

Introduction. A new scheme of a flat statically determinate regular lattice is proposed. The lattice rods are hinged. The study aims at deriving a formula for the dependence on the number of panels of the first natural oscillation frequency of nodes endowed with masses, each of which has two degrees of freedom in the lattice plane. The rigidity of all rods is assumed to be the same, the supports (movable and fixed hinges) — nondeformable. Another objective of the study is to find the dependence of the stresses in the most compressed and stretched rods on the number of panels in an analytical form.

Materials and Methods. An approximate Dunkerley's method was used to determine the lower bound for the lattice natural frequency. The lattice rigidity was found in analytical form according to Maxwell-Mohr formula. The rod stresses and the reactions of the supports were determined from the equilibrium equations compiled for all lattice nodes. Generalization of the result to an arbitrary number of panels was performed by induction using Maple symbolic math operators for analytical solutions to a number of problems for lattices with different number of panels.

Results. The lower analytical estimate of the first oscillation frequency was in good agreement with the numerical solution for the minimum frequency of the oscillation spectrum of the structure. Formulas were found for the stresses in four most compressed and stretched rods and their linear asymptotics. All required transformations were made in the system of Maple symbolic math.

Discussion and Conclusions. The obtained dependence of the first frequency of lattice oscillations on the number of panels, mass and dimensions of the structure has a compact form and can be used as a test problem for numerical solutions and optimization of the structure.

Keywords: lattice, natural frequency, Dunkerley's estimate, induction, Maxwell–Mohr formula, Maple, lower frequency estimate, analytical solution, rod stresses, asymptotics.

Funding information. The research is done with the financial support from RFFI within the frame of research project no. 22–21–00473.

Acknowledgments. The author would like to thank the reviewers, whose critical evaluation of the submissions and suggestions for improvement contributed significantly to the quality of this article.

For citation. M. N. Kirsanov. Analytical Estimation of the Natural Vibration Frequency of a Planar Lattice. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 315–322. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-315-322

Введение. Решетчатые конструкции широко применяются в машиностроении как несущие или ограждающие элементы. Методика расчета собственных частот колебаний решетки традиционно базируется на численных расчетах, как правило, использующих метод конечных элементов с применением специализированных пакетов. Значительно реже применяются аналитические методы. Развитие математических пакетов символьной математики (Maple, Wolfram Mathematica, Derive, Maxima и др.) дает возможность искать такие решения для регулярных систем, в которых возможен учет порядка регулярности (числа периодических структур конструкции, например, числа панелей) в решении. Цель исследования — найти аналитическую зависимость нижней границы первой частоты решетчатой конструкции от числа панелей. Зависимость решения от числа панелей значительно расширяет область применения формулы и дает возможность оптимизировать конструкцию по какому-либо параметру. Впервые проблемой существования и расчета статически определимых регулярных стержневых систем занялись Хатчинсон Р. и Флек Н. [1, 2]. В [3, 4] такие конструкции изучались в связи с задачами оптимизации. Существуют также аналитические решения в виде конечных формул для прогибов регулярных плоских [5–7] и пространственных ферм [8]. В справочнике [9] приводятся формулы для прогибов и смещений опор плоских ферм и решеток с произвольным числом панелей. В [10–13] получены нижние оценки первой собственной частоты колебаний плоских ферм, найденные методом индукции для произвольного порядка регулярной конструкции.

Есть другое направление аналитических исследований конструкций [14–16]. В этих работах решение находится в системе Maple в виде тригонометрических рядов.

В настоящей работе используется метод индукции, заключающийся в обобщении ряда отдельных расчетов решеток с последовательно увеличивающимся числом панелей на случай произвольного числа панелей. Во всех преобразованиях используются операторы системы символьной математики Maple. Объектом исследования

является новая схема регулярной статически определимой плоской решетки прямоугольного очертания в виде несимметричной фермы на двух опорах. Ставится задача вывести аналитическую зависимость основной частоты колебаний конструкции от числа панелей. Выведенная формула может быть использована в задачах оптимизации и для оценки численных решений подобных конструкций большого порядка, для которых в численных расчетах возможны погрешности, связанные с накоплением ошибок округления.

Материалы и методы. В ферме длиной $(2n-1)a$ и высотой $4h$ содержится $5(n+1)$ узлов, включая и три опорных узла (один для крепления левой опорной стойки, два — для правых стержней, моделирующих неподвижный шарнир). Число стержней, включая три опорных стержня, $N=10n+4$. Ферма статически определимая. При расчете частот колебаний конструкции предполагается, что масса фермы сосредоточена в узлах.

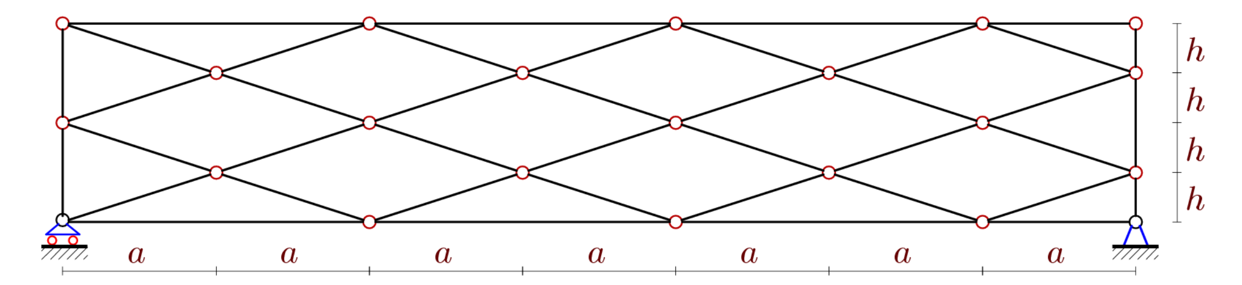


Рис. 1. Схема решетки, n=4 (рисунок автора)

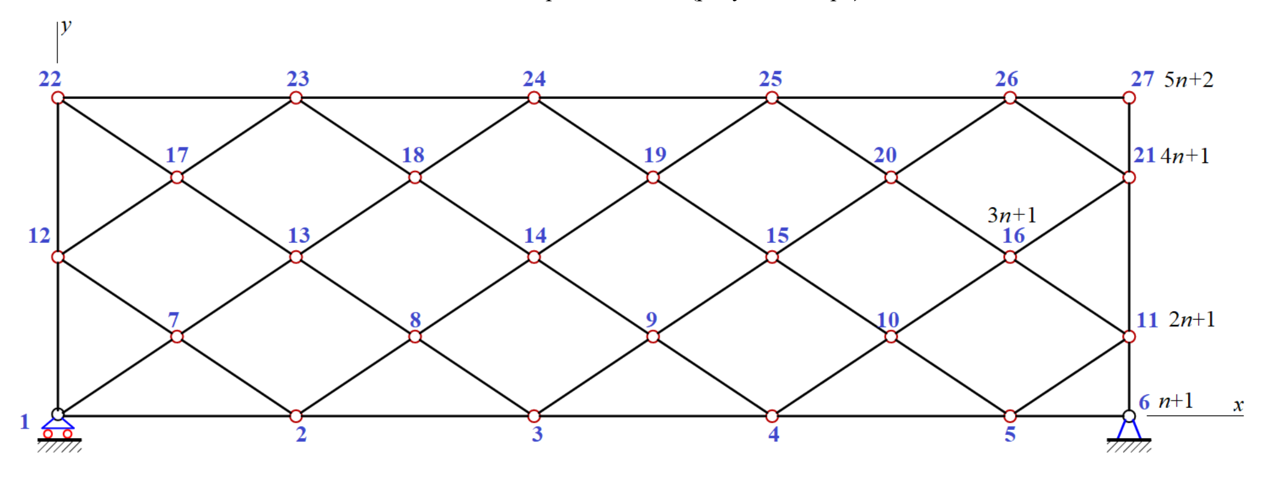


Рис. 2. Нумерация узлов решетки, n=5 (рисунок автора)

Вычисление усилий выполняется в системе Maple по программе [17]. Узлы и стержни фермы нумеруются (рис. 2). Начало координат находится в левой опоре. Координаты задаются в циклах.

Структура решетки устанавливается порядком соединения стержней в узлах. Для этого вводятся специальные списки $\Phi_\alpha=[i_1,i_2]$ номеров i_1, i_2 концов стержней $\alpha=1,..,N$. Стержни нижнего внешнего контура, например, имеют следующие номера узлов по концам: $\Phi_i=[i,i+1],\ i=1,..,n.$ Таким же образом задаются и номера концов остальных стержней решетки. Система уравнений равновесия узлов в проекциях на оси координат составляется в матричном виде $\mathrm{GS}=\mathrm{B}$, S — вектор всех усилий в стержнях, включая и три реакции опор, B — вектор внешних узловых нагрузок. Матрица системы G состоит из направляющих косинусов усилий. При этом одно и то же усилие приложено к разным концам стержня и направлено в разные стороны:

$$G_{2\Phi_{i,2}-1,i}=-l_{x,i}/l_i, G_{2\Phi_{i,2},i}=-l_{y,i}/l_i;$$
$$G_{2\Phi_{i,1}-1,i}=l_{x,i}/l_i, G_{2\Phi_{i,1},i}=l_{y,i}/l_i,\ i=1,...,N,$$

где $l_{x,i}=x_{\Phi_{i,1}}-x_{\Phi_{i,2}}$, $l_{y,i}=y_{\Phi_{i,1}}-y_{\Phi_{i,2}}$ — проекции условных векторов стержней на оси координат;

$l_i=\sqrt{l_{x,i}^2+l_{y,i}^2}$ — длина стержня i=1,..,N.

Усилия в стержнях решетки можно получить из решения системы уравнений в символьном или численном виде.

Результаты исследования. Рассмотрим напряженное состояние решетки в случае нагружения по всем узлам вертикальными силами P (рис. 1). На рис. 3 дана картина распределения усилий в стержнях конструкции. Толщины отрезков на рисунке условно пропорциональны модулям соответствующих усилий. Синим цветом выделены сжатые стержни, красным — растянутые. Значения усилий отнесены к величине P нагрузки на узел с округлением до двух значащих цифр. Наиболее растянутый стержень ожидаемо оказался в середине нижнего пояса, наиболее сжатый — в нижнем стержне на правой боковой стороне конструкции.

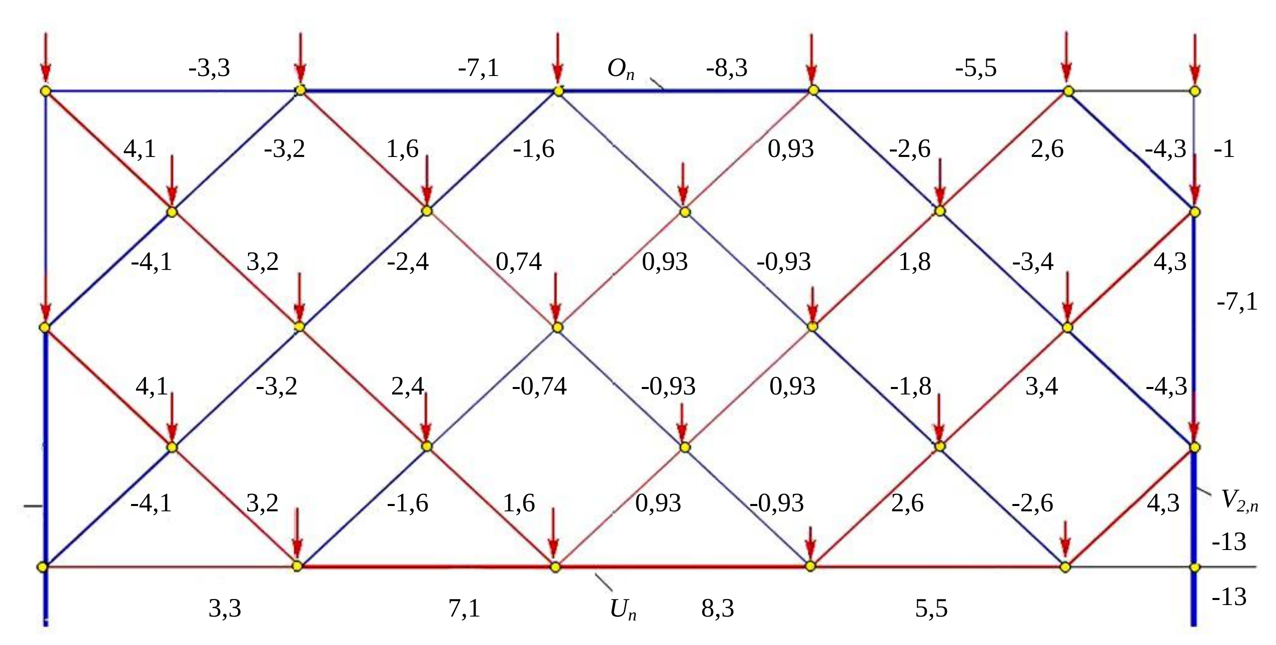


Рис. 3. Распределение усилий по стержням решетки, a=4 м, h=3 м, n=5 (рисунок автора)

Аналитические зависимости усилий в наиболее сжатых и растянутых стержнях от числа панелей получаются методом индукции из обобщения последовательностей отдельных решений. Например, для усилия $V_{1,n}$ в нижнем стержне левой стороны решетки последовательность значений для решеток порядка n = 1, 2, 3, ... имеет вид: $V_{1,n}/P = -2,\ -12,\ -28,\ -54,\ -84,\ -126,\ -170,\ -228,\ -286,\ -360,\ldots$. Рекуррентное уравнение для общего члена этой последовательности дает оператор rgf_findrecur системы Maple:

$$V_{1,n} = V_{1,n-1} + 2V_{1,n-2} - 2V_{1,n-3} - V_{1,n-4} + V_{1,n-5}.$$

Решение уравнения с помощью оператора rsolve:

$$V_{1,n} = -P(30n^2 - 2(7-(-1)^n)n - (-1)^n + 1)/(8(2n-1))\ .$$

Таким же образом находятся и другие выражения для критических усилий:

$$O_n = -Pa(20n^3 - 30n^2 + 5 - 4(\cos\varphi + \sin\varphi)(1-2n) - \cos(2\varphi))/(32(2n-1)h);$$

$$U_n = -O_n;$$

$$V_{2,n} = -P(5n^2 - n - 1)/(2n-1),$$

где $\varphi = \pi n/2$. Интересно заметить, что усилия $V_{1,n}$ и $V_{2,n}$ не зависят от размеров a и h.

Аналитическая форма решений позволяет найти их асимптотики с помощью оператора limit системы Maple:

$$\lim_{n\to\infty} V_{1,n} = -3P_{sum}/8,\ \lim_{n\to\infty} V_{2,n} = -3P_{sum}/8;$$

$$\lim_{n\to\infty} O_n/n = -\lim_{n\to\infty} U_n/n = -aP_{sum}/(16h),$$

где $P_{sum} = 5nP$ — суммарная нагрузка на решетку. Для усилий $V_{1,n}$ и $V_{2,n}$ в стержнях на боковых сторонах решетки асимптоты горизонтальные, для усилий O_n и U_n на верхнем и нижнем поясах — наклонные.

Частота собственных колебаний. Из всего спектра частот собственных колебаний конструкции для оценки ее динамического поведения наиболее важной является первая, низшая, частота. Ее значение входит в большинство решений задач динамики конструкции. Эта величина требуется в том числе и для оценки сейсмических характеристик сооружения. Нижнюю границу первой частоты для регулярных конструкций в форме зависимости от числа панелей можно получить аналитически.

При определении собственных частот колебаний конструкции принята упрощенная модель инерционных свойств фермы. Предполагается, что стержни решетки не имеют массы, а вся масса распределена равномерно по узлам. Пренебрегая движением опор, получаем общее число степеней свободы равное $K = 10n$. Формула Донкерлея [13] для оценки нижней границы первой частоты имеет вид:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^{K} \omega_p^{-2}, \tag{1}$$

где ω_p — парциальные частоты конструкции. Парциальные частоты колебаний масс определяются из уравнения:

$$m\ddot{y}_p + D_p y_p = 0,\ p=1,...,K. \tag{3}$$

Здесь $y_p = y_p(t)$ — координата узла *p;* $\ddot{y}_p$ — ускорение; D_p — жесткость, величина обратная податливости $\delta_p = 1/D_p$. Податливость можно вычислить по формуле Максвелла-Мора:

$$\delta_p = 1/D_p = \sum_{\alpha=1}^{N} \left(S_\alpha^{(p)}\right)^2 l_\alpha / (EF), \tag{4}$$

где $S_\alpha^{(p)}$ — усилие в стержне с номером α от действия вертикальной единичной силы, приложенной к узлу *p*, где расположена масса. Коэффициент жесткости и парциальная частота зависят от места, где расположена масса. Для гармонических колебаний $y_p = U_p \sin(\omega t + \varphi)$ из (3) следует $\omega_p = \sqrt{D_p / m}$. Подстановка этого выражения в (4) дает формулу для оценки первой частоты только по парциальным частотам колебаний масс:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^{K} \omega_p^{-2} = m\sum_{p=1}^{K} \delta_p = m(\Delta_{n,v} + \Delta_{n,h}). \tag{5}$$

Отдельно выделены суммы для колебаний по вертикальному направлению $\Delta_{n,v}$ и горизонтальному $\Delta_{n,h}$. Последовательный расчет частот колебаний решеток различного порядка показывает, что коэффициент $\Delta_{n,v}$ в (5) имеет вид:

$$\begin{aligned}
\Delta_{1,v} &= (14h)/(EF);\\
\Delta_{2,v} &= (44a^3 + 75c^3 + 250h^3)/(9EFh^2);\\
\Delta_{3,v} &= (24a^3 + 25c^3 + 36h^3)/(EFh^2);\\
\Delta_{4,v} &= 2(154a^3 + 175c^3 + 176h^3)/(7EFh^2);\\
\Delta_{5,v} &= 2(1254a^3 + 1125c^3 + 791h^3)/(27EFh^2).
\end{aligned}$$

В общем случае для парциальных частот по вертикали:

$$\Delta_{n,v} = \left(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_{3y} h^3\right) / \left(EFh^2\right). \tag{6}$$

Для парциальных частот по горизонтали:

$$\Delta_{n,v} = \left(C_4 a^3 + C_5 c^3 + C_{6y} h^3\right) / \left(EFa^2\right). \tag{7}$$

Используя оператор rgf_findrecur системы Maple, получаем однородное рекуррентное уравнение седьмого порядка для определения коэффициента при a^3:

$$C_{1,n} = 3C_{1,n-1} - C_{1,n-2} - 5C_{1,n-3} + C_{1,n-4} + C_{1,n-5} - 3C_{1,n-6} + C_{1,n-7}\ .$$

Решение уравнения дает оператор rsolve:

$$C_1 = (n^4 - 2n^3 + 61n^2 - 6(3(-1)^n + 10)n + 9(-1)^n - 9)/18. \tag{8}$$

Таким же образом находятся и другие коэффициенты:

$$\begin{aligned}
C_2 &= 25n(n-1)/6;\\
C_3 &= (136n^2 + 2(9(-1)^n - 14)n - 9(-1)^n - 15)/(6(2n-1)).
\end{aligned} \tag{9}$$

Аналогично:

$$C_4 = (164n^3 - (36\cos(2\varphi)+142)n^2 + (24\cos(2\varphi) - 24\sin\varphi + 24\cos\varphi + 20)n -$$
$$- 3\cos(2\varphi) + 12\sin\varphi - 12\cos\varphi + 27)/(2n-1)/12;$$
$$C_5 = (10n^3 - 5n^2 + 15n + 8)/(2(2n-1)); \quad (10)$$
$$C_6 = (36n^3 - (28 + 8\cos(2\varphi))n^2 + (128 + 22\cos(2\varphi) + 24\cos\varphi - 24\sin\varphi)n -$$
$$-12\cos\varphi - 9\cos(2\varphi) + 109 + 12\sin\varphi)/(2n-1)^2/2,$$

где $\varphi = \pi n/2$.

В результате из (5–7) следует выражение для нижней оценки первой частоты:

$$\omega_D^{-2} = m\left(\left(C_1a^3 + C_2c^3 + C_3h^3\right)/h^2 + \left(C_4a^3 + C_5c^3 + C_6h^3\right)/a^2\right)/(EF). \quad (11)$$

с коэффициентами (8), (9) и (10).

Оценка погрешности решения (11) возможна из сравнения с минимальной частотой всего спектра собственных частот решетки, полученной численно. Спектр системы с многими степенями свободы находится из решения задачи о собственных числах матрицы. Дифференциальные уравнения динамики масс конструкции с числом степеней свободы K записываются в матричном виде:

$$m\mathrm{I}_K\ddot{\mathrm{Y}} + \mathrm{D}_K\mathrm{Y} = 0, \quad (12)$$

где D_K — матрица жесткости фермы; Y — вектор смещений масс; I_K — единичная матрица. Пусть B_K — матрица, обратная D_K. Умножение (12) слева на B_K, дает уравнение:

$$m\mathrm{B}_K\ddot{\mathrm{Y}} + \mathrm{I}_K\mathrm{Y} = 0. \quad (13)$$

Связь $\ddot{\mathrm{Y}} = -\omega^2\mathrm{Y}$ справедлива для гармонических колебаний с частотой ω. Отсюда из (13) следует задача о собственных значениях: $\mathrm{B}_K\mathrm{Y} = \lambda\mathrm{Y}$, где $\lambda = 1/(\omega^2 m)$ — собственные значения матрицы B_K. Элементы матрицы податливости находятся по формуле Максвелла-Мора. Для вычисления собственных значений матрицы в системе Maple предназначен оператор Eigenvalues из пакета линейной алгебры LinearAlgebra. Решение этой задачи в общем случае можно получить только в численной форме.

Пример. Стальная решетка имеет длину панели а = 2 м, высоту $h = 1$ м, массы в узлах $m = 300\,кг$, жесткость стержней $EF = 0{,}8\cdot10^5\,кН$. На рис. 4 показаны зависимости первой частоты от числа панелей, полученные численно и аналитически.

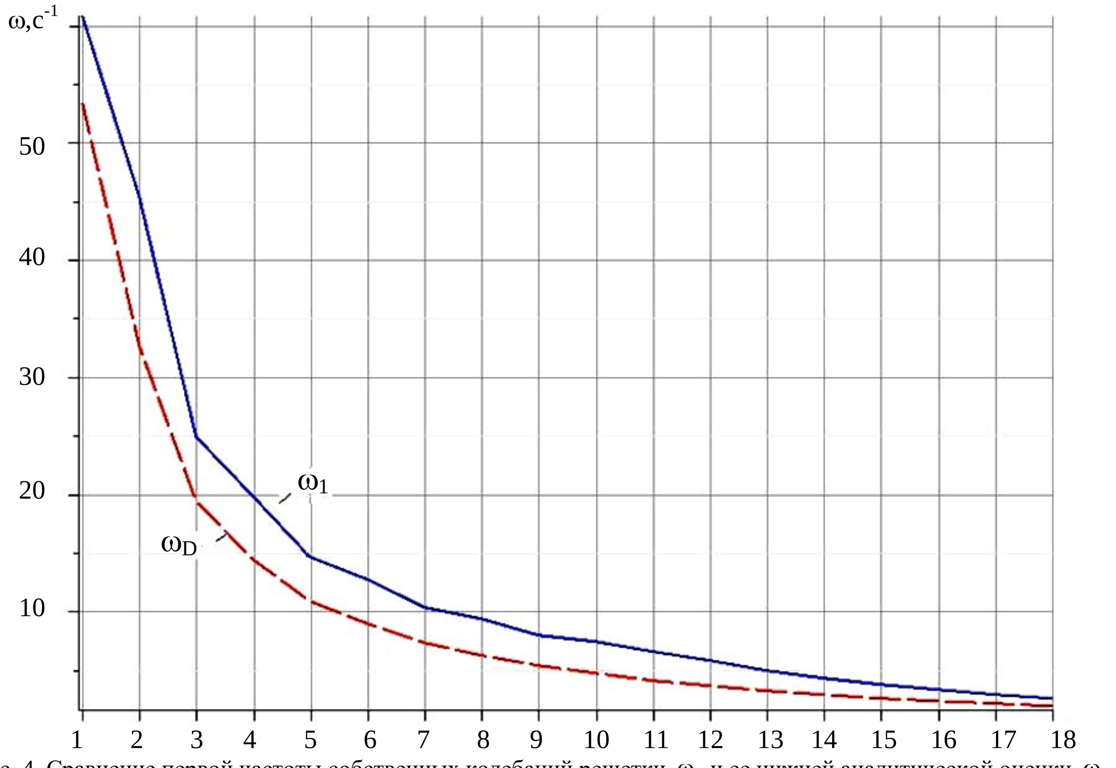


Рис. 4. Сравнение первой частоты собственных колебаний решетки ω_1 и ее нижней аналитической оценки ω_D в зависимости от числа панелей (рисунок автора)

Относительная погрешность $\varepsilon = (\omega_1 - \omega_D)/\omega_1$, в зависимости от числа панелей (рис. 5), показывает, что с увеличением числа панелей погрешность, начиная с n =1, растет, а затем монотонно и достаточно быстро убывает. Это особенно важно при использовании полученной формулы при расчете решеток с большим числом панелей, для которых численный счет начинает набирать погрешность, связанную с накоплением ошибок округления, а затраты на компьютерные ресурсы быстро растут.

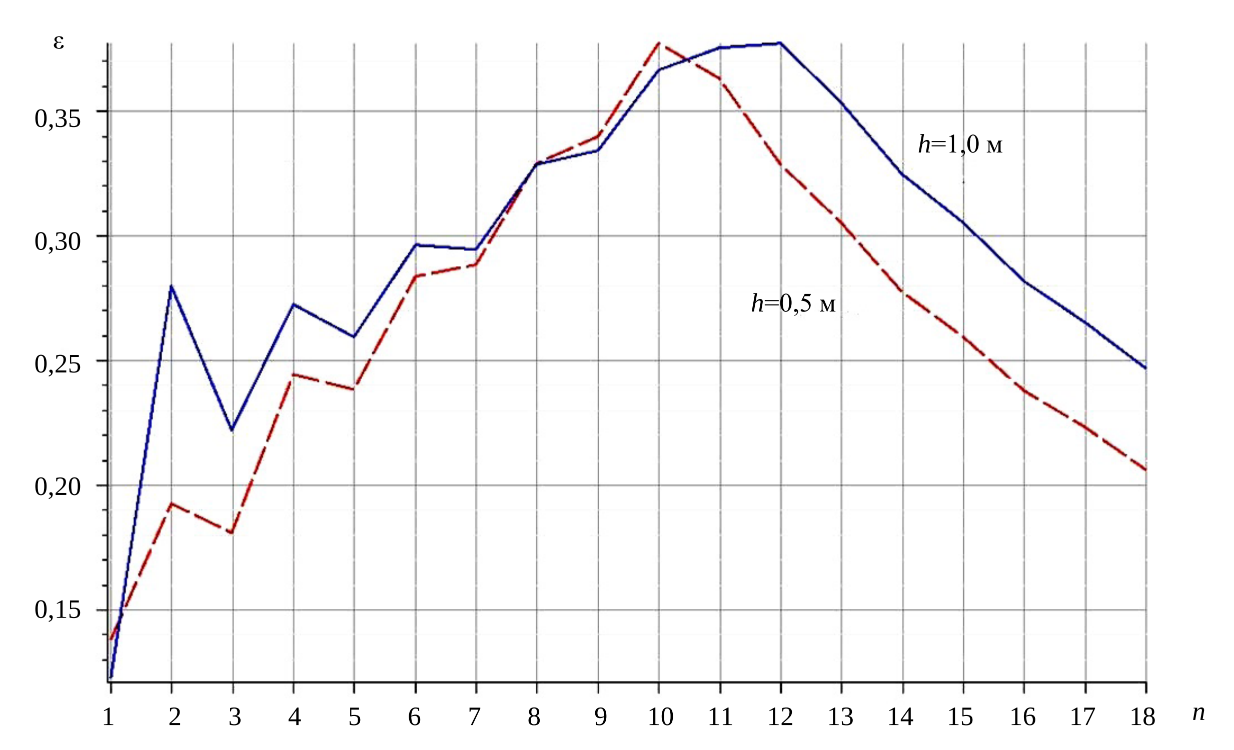


Рис. 5. Погрешность аналитического решения для собственной частоты в зависимости от числа панелей и высоты *h* (рисунок автора)

Обсуждение и заключения. Предложена схема статически определимой плоской решетки. Поставлена задача получить аналитическое выражение нижней границы первой частоты собственных колебаний решетчатой фермы для произвольного числа панелей в конструкции. Решение получено методом индукции в системе Maple. Наличие экстремумов на построенных кривых дает возможность оптимизировать число панелей решетки, выбрав наибольшую точность оценки и подобрав требуемую частоту колебаний. В предложенном исследовании учтены горизонтальные колебания масс. Учет горизонтальных колебаний несколько усложняет итоговую расчетную формулу, делая ее более громоздкой. Помимо использованного метода Донкерлея, для оценки первой частоты есть более точный энергетический метод Рэлея, дающий оценку первой частоты сверху. Однако и это решение в рассматриваемом случае имеет излишне громоздкий вид и здесь не приводится.

Список литературы

1. Hutchinson, R. G. Microarchitectured Cellular Solids — the Hunt for Statically Determinate Periodic Trusses / R. G. Hutchinson, N. A. Fleck // ZAMM Journal for Applied Mathematics and Mechanics. — 2005. — Vol. 85. — P. 607–617. https://doi.org/10.1002/zamm.200410208

2. Hutchinson, R. G. The Structural Performance of the Periodic Truss / R. G. Hutchinson, N. A. Fleck // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2006. — Vol. 54. — P. 756–782. https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2005.10.008

3. Kaveh, A. Optimal Analysis of Structures by Concepts of Symmetry and Regularity / A. Kaveh. — Vienna : Springer, 2013. — 463 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1565-7

4. Kaveh, A. Truss Optimization with Natural Frequency Constraints Using a Hybridized CSS–BBBC Algorithm with Trap Recognition Capability / A. Kaveh, A. Zolghadr // Computers & Structures. — 2012. — Vol. 102–103. — P. 14–27. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2012.03.016

5. Ovsyannikova, V. M. Dependence of Deformations of a Trapezous Truss Beam on the Number of Panels / V. M. Ovsyannikova // Structural Mechanics and Structures. — 2020. — Vol. 3 (26). — P. 13–20.

6. Ilyushin, A. S. The Formula for Calculating the Deflection of a Cmpound Externally Statically Indeterminate Frame / A. S. Ilyushin // Structural Mechanics and Structures. — 2019. — Vol. 22. — P. 29–38.

7. Qiao Dai. Analytical Dependence of Planar Truss Deformations on the Number of Panels / Qiao Dai // AlfaBuild. — 2021. — Vol. 17. — P. 1701. 10.34910/ALF.17.1
8. Kirsanov, M. N. The Stress-Strain State of a Rectangular Covering Spatial Truss / M. N. Kirsanov // Construction of Unique Buildings and Structures. — 2020. — Vol. 91. — P. 9104.
9. Kirsanov, M. Trussed Frames and Arches: Schemes and Formulas / M. Kirsanov. — UK : Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2020. — 178 p.
10. Petrichenko, E. A. Lower Bound of the Natural Oscillation Frequency of the Fink Truss / E. A. Petrichenko // Structural Mechanics and Structures. — 2020. — Vol. 3 (26). — P. 21–29.
11. Petrenko, V. F. The Natural Frequency of a Two-Span Truss / V. F. Petrenko // AlfaBuild. — 2021. — Vol. 20. — P. 2001.
12. Vorobev, O. V. Bilateral Analytical Estimation of the First Frequency of a Plane Truss / O. V. Vorobev // Construction of Unique Buildings and Structures. — 2020. — Vol. 92. — P. 9204.
13. Vorobyev, O. About Methods of Obtaining Analytical Solution for Eigenfrequencies Problem of Trusses / O. Vorobyev // Structural Mechanics and Structures. — 2020. — Vol. 24. — P. 25–38.
14. Goloskokov, D. P. Approximate Analytical Solutions in the Analysis of Thin Elastic Plates / D. P. Goloskokov, A. V. Matrosov // AIP Conference Proceedings. — 2018. — Vol. 1959. — Art. 070012. 10.1063/1.5034687
15. Goloskokov, D. P. Approximate Analytical Approach in Analyzing an Orthotropic Rectangular Plate with a Crack / D. P. Goloskokov, A. V. Matrosov // Materials Physics and Mechanics. — 2018. — Vol. 36. — P. 137–141.
16. Goloskokov, D. P. Comparison of Two Analytical Approaches to the Analysis of Grillages / D. P. Goloskokov, A. V. Matrosov // In: Proc. 2015 Int. Conf. “Stability and Control Processes” in Memory of V. I. Zubov (SCP). — 2015. — P. 382–385. 10.1109/SCP.2015.7342169
17. Buka-Vaivade, K. Calculation of Deformations of a Cantilever-Frame Planar Truss Model with an Arbitrary Number of Panels / K. Buka-Vaivade, M. N. Kirsanov, D. O. Serdjuks // Vestnik MGSU. — 2020. — Vol. 15. — P. 510–517. 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517

Поступила в редакцию 23.09.2022.
Поступила после рецензирования 14.10.2022.
Принята к публикации 14.09.2022.

Об авторе:

Михаил Николаевич Кирсанов, профессор кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14), доктор физико-математических наук, ResearcherID, ScopusID, ORCID, C216@ya.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 621.778.1
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330

Научная статья

О контроле технического состояния лифтовых канатов на основе технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения



А. В. Панфилов ✉, А. Р. Юсупов, А. А. Короткий, Б. Ф. Иванов
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ panfilov@ikcmysl.ru

Аннотация
Введение. Рассмотрены проблема безопасности и ситуация с аварийностью при эксплуатации лифтовых установок. С точки зрения статистики обозначена роль дефектов лифтовых канатов как фактора опасных инцидентов. Перечислены неисправности механического оборудования лифта, связанные с браковочными показателями канатов. Отмечено различие в документальной фиксации браковочных показателей и норм браковки канатов подъемных сооружений.
Материалы и методы. Описываются известные подходы к контролю канатов подъемных сооружений. Подчеркивается обязательность визуально-измерительного контроля (ВИК) для выявления таких норм браковки стальных лифтовых канатов, как: изменение геометрии, коррозия и износ, обрывы проволок, температурное воздействие и пр. Норма браковки представлена в виде математической системы. Техническое состояние при эксплуатации лифтовых канатов интегрально оценивается по совокупности выявленных дефектов на фиксированной длине. Обосновано решение создать программно-аппаратный комплекс (ПАК) для практической реализации визуально-измерительного контроля.
Результаты исследования. Разработанный лабораторный образец ПАК ВИК состоит из аппаратной части, модуля обработки видеопотока, средства коммуникации для связи с сервером, специально созданного софта и клиентского мобильного приложения. ПАК ВИК реализует следующие функции:
– автоматическое обнаружение и классификация основных значимых дефектов канатов на основе глубокой сверточной искусственной нейронной сети;
– демонстрация объемного изображения каната и алгоритма развертки изображения с компенсацией искажений, по которому фиксируются метрические характеристики дефектов;
– интегральная оценка технического состояния каната по совокупности обнаруженных дефектов;
– цветовая интерпретация фактического технического состояния каната с последующей передачей на мобильное устройство пользователя.
Предварительные испытания показали пригодность ПАК ВИК для определения дефектов. Достоверность результатов по выявлению и квалификации дефектов превысила 80 %. Продолжаются работы по глубокому обучению системы.
Обсуждение и заключения. ПАК ВИК лифтовых канатов позволяет исключить риски визуального контроля, обусловленные психофизическим состоянием человека, работает дистанционно и бесконтактно. Предложенное авторами решение автоматически оценивает браковочные показатели по пяти критериям: обрывы наружных проволок, поверхностный износ, изменение диаметра каната, волнистость, следы температурного воздействия. Важный результат ВИК стальных канатов с использованием компьютерного зрения и искусственного интеллекта — повышение надежности и безопасности при эксплуатации лифтового оборудования.

***Ключевые слова*:** дефекты, лифтовые канаты, нормы браковки, визуально-измерительный контроль, программно-аппаратный комплекс, искусственные нейронные сети, компьютерное зрение.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследования ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

Для цитирования. О контроле технического состояния лифтовых канатов на основе технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения / А. В. Панфилов, А. Р. Юсупов, А. А. Короткий, Б. Ф. Иванов // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 323–330. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330

Original article

On the Control of the Technical Condition of Elevator Ropes Based on Artificial Intelligence and Computer Vision Technology

Alexey V. Panfilov, **Alexander R. Yusupov**, **Anatoly A. Korotkiy**, **Boris F. Ivanov**
Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
panfilov@ikcmysl.ru

Abstract
Introduction. The safety problem and the situation with accidents during the operation of elevator installations are elucidated. The role of elevator rope defects as a factor of dangerous incidents is indicated from the point of view of statistics. The malfunctions of the elevator mechanical equipment related to the defective indices of the ropes are listed. There is a difference in the documentary fixation of defective indices and rejection rates of ropes of lifting structures.
Materials and Methods. The well-known approaches to the control of ropes of lifting structures were described. It was emphasized that visual inspection control (VIC) was required to identify such rejection rates of steel elevator ropes as geometry change, corrosion and wear, wire breaks, temperature exposure, etc. The rejection rate was presented in the form of a mathematical system. The technical condition of elevator ropes during the operation was integrally assessed by the totality of identified defects at a fixed length. The decision to create a software and hardware complex (PAC) for the practical implementation of visual and measuring control was validated.
Results. The developed PAC VIC laboratory sample consisted of a hardware part, a video stream processing module, communicator for the server connectivity, specially designed software, and a client mobile application. PAC VIC implemented the following functions:

– automatic detection and classification of the major significant rope defects based on a deep convolutional artificial neural network;

– demonstration of a three-dimensional image of a rope and an image scanning algorithm with distortion compensation, according to which the metric characteristics of defects were fixed;

– integral assessment of the technical condition of the rope according to the totality of detected defects;

– color interpretation of the actual technical condition of the rope with subsequent transmission to the user's mobile device.

Preliminary tests have shown the suitability of the PAC VIC for identifying defects. The reliability of the results for the identification and qualification of defects exceeded 80%. Work on deep learning of the system continues.
Discussion and Conclusions. PAC VIC of elevator ropes provides eliminating the risks of visual control caused by the psychophysical state of a person. It works remotely and contactless. The solution proposed by the authors automatically evaluates the rejection rates according to five criteria: external wire breaks, surface wear, rope diameter change, undulation, traces of temperature exposure. An important result of the VIC of steel ropes using computer vision and artificial intelligence is an increase in reliability and safety during the operation of elevator equipment.

Keywords: defects, elevator ropes, rejection rates, visual inspection control, hardware-software package, artificial neural networks, computer vision.

Acknowledgements. The authors are grateful to the FSBI “Fund for the Promotion of the Development of Small Businesses in the Sphere of Science and Technology” for the financial support of the study.

For citation. A. V. Panfilov, A. R. Yusupov, A. A. Korotkiy, B. F. Ivanov. On the Control of the Technical Condition of Elevator Ropes Based on Artificial Intelligence and Computer Vision Technology. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 323–330. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330

Введение. Вопросам безопасности при эксплуатации лифтового оборудования уделяется повышенное внимание[1, 2, 3]. В Российской Федерации эксплуатируются около 500 тыс. пассажирских, больничных и грузовых лифтов. Согласно статистике аварий лифтов, главные их причины — недостаточное качество лифтов и комплектующих, а также ненадлежащие техническое обслуживание и ремонт.

Анализ аварийности лифтов показывает, что около 30 % инцидентов прямо или косвенно связаны с техническим состоянием канатов [1]. Чрезвычайно опасны дефекты, развитие которых приводит к падению кабины. Аварии пассажирских лифтов, особенно трагедии с жертвами, — очень резонансные события. За нарушение требований безопасности при эксплуатации лифтов предусмотрена административная[4] и уголовная[5] ответственность.

Своевременный и качественный контроль технического состояния стальных канатов способствует предотвращению опасных инцидентов [2–5].

Повреждения в канатах возникают из-за их низкого качества и ошибок при монтаже. Следствием неверно выполненных работ может быть недопустимое взаимодействие с элементами оборудования лифта, в том числе электрическими.

Стальные канаты можно считать индикатором технического состояния лифтового оборудования. Их дефекты сигнализируют об износе ручьев шкивов, проскальзывании каната на шкиве (в том числе из-за излишней смазки), о перекосе креплений лебедки, о люфтах в элементах передаточных механизмов привода и т. д. Возможные неисправности элементов механической части лифта в зависимости от браковочных показателей канатов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Неисправности механического оборудования лифта, связанные с браковочными показателями канатов

№ п/п	Критерии браковки	Индикатор возможной неисправности
1	Обрывы наружных проволок	1. Износ ручья шкива. 2. Перекос канатоведущего шкива при монтаже либо техническом обслуживании. 3. Соприкосновение с внешними элементами при движении в шахте. 4. Ненадлежащее качество поставляемого стального каната.
2	Поверхностный износ каната	1. Износ ручья шкива. 2. Перекос шкива при монтаже или техническом обслуживании.
3	Местное увеличение или уменьшение диаметра каната	1. Ненадлежащее качество поставляемого стального каната. 2. Дефекты монтажа или обслуживания уравновешивающих устройств и мест заделок стальных канатов.
4	Волнистость	1. Ненадлежащее качество поставляемого стального каната. 2. Дефекты монтажа или ненадлежащее техобслуживание уравновешивающих устройств и мест заделок стальных канатов.
5	Температурное воздействие (электрический дуговой разряд)	1. Воздействие электрического тока при монтаже, ненадлежащее техническое обслуживание в процессе эксплуатации.
6	Дефекты уравновешивающих устройств и мест заделок стальных канатов	1. Дефекты монтажа. 2. Ненадлежащее техническое обслуживание. 3. Установка канатов из разных партий.

[1] О порядке обеспечения безопасности опасных объектов в общественных и жилых зданиях : Пост. Правительства РФ от 24.06.2017 № 743 // Правительство России : [сайт]. URL: http://government.ru/docs/28241/ (дата обращения: 25.10.2022).
[2] ГОСТ Р 55964-2014. Лифты. Общие требования безопасности при эксплуатации / Российское лифтовое объединение, «Лифтсервис» ; Технический комитет по стандартизации ТК 209 // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200109313 (дата обращения: 25.10.2022).
[3] ГОСТ Р 54999-2012. Лифты. Общие требования к инструкции по техническому обслуживанию лифтов / Российское лифтовое объединение ; Технический комитет по стандартизации ТК 209 // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200096000 (дата обращения: 25.10.2022).
[4] Нарушение требований промышленной безопасности или условий лицензий на осуществление видов деятельности в области промышленной безопасности опасных производственных объектов. Ст. 9.1.1 КоАП РФ // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/6db72644d55f955ad23b924b678184a5d027d99f/ (дата обращения: 25.10.2022).
[5] Производство, хранение, перевозка либо сбыт товаров и продукции, выполнение работ или оказание услуг, не отвечающих требованиям безопасности. Ст. 238 УК РФ // Гарант : [сайт]. URL: https://base.garant.ru/10108000/82fa894382554e9c56db483eff62c412/ (дата обращения: 25.10.2022).

Есть существенное различие браковочных показателей и норм браковки канатов различных подъемных сооружений [6, 7] и лифтов. В последнем случае критерии указываются в руководстве по эксплуатации конкретного лифта. Такой подход сокращает количество индикаторов дефектности, что, безусловно, не способствует повышению эксплуатационной безопасности. В [1] изложены критерии и нормы браковки.

Материалы и методы. Канаты — это продукция глубокой переработки стали. При снижении запаса их прочности до критического значения эксплуатация недопустима.

Широко известен контроль канатов подъемных сооружений методом магнитной дефектоскопии. Его задействуют при диагностике пассажирских канатных дорог, грузоподъемных кранов, подъемников. Данный подход позволяет распознавать внутренние, невидимые глазу дефекты, измерять потери площади поперечного сечения каната, обнаруживать локальные несоответствия. Как правило, метод используют для контроля стальных канатов диаметром более 20 мм.

Средний срок службы лифтовых канатов регламентирован и не превышает 5 лет. За это время циклы нагружений не приводят к потере площади поперечного сечения и усталостным разрушениям проволок внутренних слоев. По этой причине магнитную дефектоскопию не применяют для лифтовых установок.

Наиболее распространенным методом оценки технического состояния лифтовых канатов является визуально-измерительный контроль (ВИК)[8]. Он позволяет оценивать техническое состояние эксплуатируемых лифтовых канатов оценивают по следующим нормам браковки:

– изменение геометрии $P1(t)$;

– коррозия и износ $P2(t)$;

– обрывы проволок (усталость) $P3(t)$;

– температурное воздействие $P4(t)$ и пр.

Здесь t — текущее время эксплуатации лифта.

Под нормой браковки понимают величину $Pi(t)$:

$$Pi(t) = Pio + Pi'(t). \tag{1}$$

Здесь Pio — склерономная часть, она не зависит от t и связана с однократным приложением нагрузок; $Pi'(t)$ — реономная часть, которая накапливается в процессе упругопластического циклического деформирования.

При оценке технического состояния каната во время эксплуатации рассчитывают потери его прочности хотя бы по одному из браковочных критериев:

$$Pi(t) \le [Pi], \tag{2}$$

где $i = 1 \div 12$.

При техническом обслуживании пассажирских лифтов проводится ВИК стальных канатов с периодичностью, определенной в руководстве по эксплуатации (как правило, один раз в месяц).

ВИК стальных канатов состоит из двух этапов:

1) осмотр каната и мест его крепления с оптическими средствами или без них;

2) измерения диаметра, износа наружных проволок, геометрических отклонений от прямолинейности, поражения электрическим током и мест крепления.

Качество ВИК при техобслуживании стальных канатов связано с физиологическими возможностями зрительного восприятия человека [4–6]. В лифте может быть от 3 до 12 параллельно расположенных канатов со сложной системой уравновешивания. Количество зависит от высоты и грузоподъемности. Оценка технического состояния канатов, уравновешивающих устройств и заделок концов предполагает работу на высоте, в сложных, стесненных условиях при недостаточной освещенности[9]. Возможности зрения человека

[6] Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/573275657 (дата обращения: 25.10.2022).

[7] Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров» / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/573191373 (дата обращения: 25.10.2022).

[8] Возможности для улучшения визуального контроля канатов. Рекомендации OITAF № 30 / Международная организация канатного транспорта // gosnadzor.ru : [сайт]. URL: https://www.gosnadzor.gov.ru/industrial/equipment/cable%20cars%20and%20funiculars/method%20www.oitaf.org/ (дата обращения: 05.11.2022).

[9] Vision-Based Technique for Lay Length Measurement of Metallic Wire Ropes / A. Vallan, M. Filippo // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58, iss. 5. P. 1756–1762.

ограничены. Известно, что после наблюдения за движущимся стальным канатом более 10 минут глаза устают и хуже воспринимают многочисленные браковочные показатели. Качественный, объективный контроль лифтовых канатов требует автоматизации процесса. Анализ литературных источников, аварий и инцидентов показал, что для автоматизации целесообразно задействовать решения на основе технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта [5–10].

Авторы поставили цель создать программно-аппаратный комплекс (ПАК) ВИК для практической реализации визуально-измерительного контроля на основе технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта[10].

Результаты исследования. В лифтах дефекты стальных канатов и их креплений автоматически обнаруживаются и идентифицируются с помощью специальных средств фото- и видеофиксации. Машинное зрение и искусственный интеллект обрабатывают изображения дефектов. Интегральная оценка типов и параметров выявленных дефектов в виде цветовой индикации передается на мобильное устройство.

ПАК ВИК автоматизирует и объединяет два метода контроля: визуальный и инструментальный.

Ниже перечислены основные функции ПАК ВИК.

1. Решение на основе глубокой сверточной искусственной нейронной сети автоматически обнаруживает и классифицирует основные дефекты канатов и их заделки.

2. Комплекс камер и алгоритм развертки изображения с компенсацией искажений дают объемное изображение каната для фактического определения метрических характеристик дефектов.

3. По совокупности обнаруженных дефектов на основе риск-анализа выполняется интегральная оценка технического состояния каната.

4. Интегральная оценка в виде цветового индикатора периодически передается на мобильное устройство пользователя.

Комплекс состоит из трех элементов.

1. Аппаратная часть. Это корпус с вмонтированными видеокамерами, которые позволяют рассматривать канат со всех сторон. Специальный модуль обрабатывает видеопоток, а средства коммуникации позволяют связаться с сервером.

2. Созданное с использованием стека технологий Pytorch, TensorFlow, OpenCV программное обеспечение ищет и классифицирует дефекты стальных канатов на основе глубокой сверточной искусственной нейронной сети.

3. Мобильное приложение информирует пользователя об итогах мониторинга.

Для фотофиксации участков подвижных стальных канатов задействуют шесть IP-камер с разрешением 640×480. Они закрепляются в корпусе, установленном в шахте лифта. Количество камер зависит от числа канатов, на которых подвешена кабина лифта. Камеры подключаются по проводному или беспроводному каналу связи к одноплатному компьютеру, который обрабатывает изображения и формирует пакетное сообщение для пересылки на сервер. Одноплатный компьютер формирует пакетное сообщение. Оно по кабелю Ethernet или беспроводному каналу связи через модем-роутер передается на сервер, который классифицирует дефекты, определяет их количество и метрологические параметры, выводит интегральную оценку технического состояния каната, интерпретирует ее как цветовой индикатор и в таком виде передает пользователю через мобильное приложение.

На рис. 1–3 представлены модули ПАК ВИК для лифтовых установок, функциональная схема и аппаратная часть комплекса.



Рис. 1. Модули ПАК ВИК (рисунок авторов)

[10] Способ визуально-измерительного контроля стального каната : патент 2775348 Рос. Федерация : D07B 1/00 ; B66B 7/1215 ; G05B 99/00 / А. А. Короткий [и др.]. № 2021107842 ; заявл. 23.03.2021 ; опубл. 29.06.2022, Бюл. № 19. 16 с.

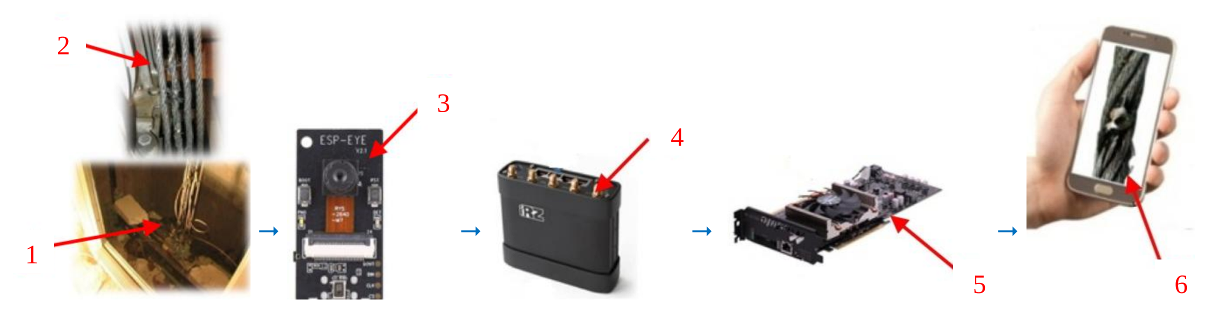
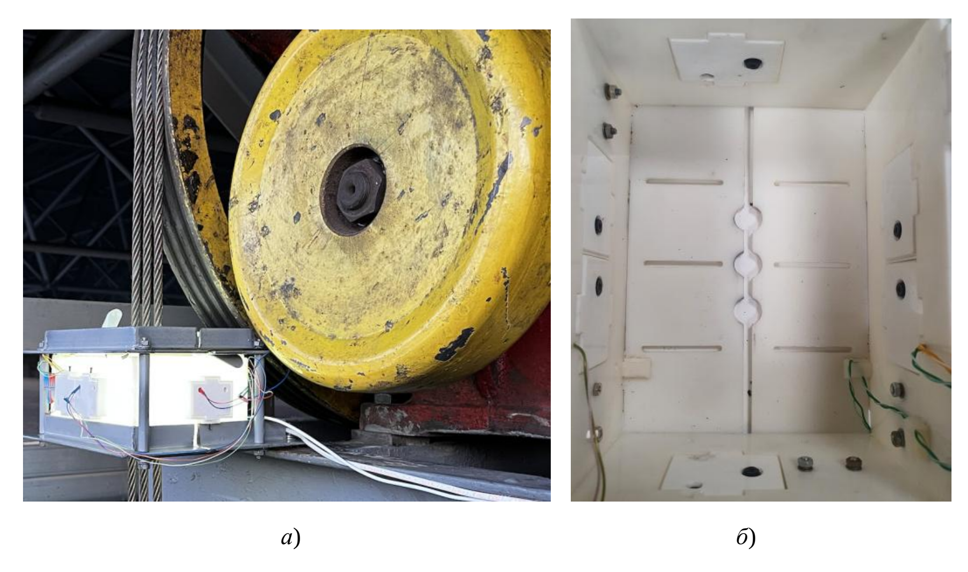


Рис. 2. Функциональная схема ПАК ВИК распознавания дефектов стальных канатов и уравновешивающих устройств на основе технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта: 1 — уравновешивающее устройство; 2 — дефекты каната; 3 — IP-камера; 4 — GSM-модем; 5 — нейровычислитель; 6 — изображение в мобильном устройстве (рисунок авторов)



а) *б*)

Рис. 3. Аппаратная часть ПАК ВИК: *а* — место в лифтовой установке; *б* — точки установки шести IP-камер (фото авторов)

ПАК ВИК с использованием компьютерного зрения идентифицирует и классифицирует основные дефекты стальных канатов лифтовых установок и уравновешивающих устройств:

1) обрывы наружных проволок;
2) поверхностный износ проволок;
3) увеличение или уменьшение диаметра каната;
4) деформацию в виде волнистости («штопора»);
5) повреждения от электрического дугового разряда;
6) дефекты уравновешивающих устройств.

В базе данных собраны фото- и видеообразы типовых дефектов стальных канатов и уравновешивающих устройств. Комплекс периодически либо по запросу выводит дистанционную интегральную оценку браковочных показателей канатов и дефектов уравновешивающих устройств и передает ее на мобильное приложение пользователя.

Вычислительный аппарат используется для интегральной оценки технического состояния стального каната и интерпретации результата с помощью цвета (красный, желтый, зеленый). Это позволяет интегрироваться с сенсорами, установленными в системах управления и диспетчерской связи лифтов, а также с программами онлайн-контроля техобслуживания «Лифт мониторинг»[11] и облачной платформой автоматизации сервисного обслуживания «Арпикон. Online»[12].

Предложенное решение предварительно испытали на лабораторной лифтовой установке с тремя канатами с органическим сердечником. Их характеристики соответствуют ГОСТ 3077−80:

– двойная свивка типа ЛК-О;
– конструкция 6×19 (1 + 9 + 9) + 1 о. с.;
– диаметр 10 мм.

[11] Русанов С. Е. Программа для ЭВМ «Лифт Мониторинг» // lmonitor.ru: [сайт]. URL: https://lmonitor.ru (дата обращения: 29.10.2022).
[12] Арпикон. Online : [сайт] / ООО «Центр». URL: https://lift.arpicon.ru (дата обращения: 29.10.2022).

Тестирование показало реализуемость метода определения перечисленных выше дефектов с использованием ПАК ВИК. Достоверность выявления и квалификации дефектов превысила 80 %. Для улучшения результатов продолжаются работы по глубокому обучению системы: совершенствуются алгоритмы, увеличивается количество и качество датасетов образов типовых дефектов стальных канатов и уравновешивающих устройств.

Обсуждение и заключения. Дефекты стальных канатов могут привести к падению кабины лифта. При техническом облуживании лифтов для полной оценки реальных рисков аварий и инцидентов бывает недостаточно визуального контроля.

Установлено, что технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта можно использовать для интегральной оценки технического состояния стальных канатов, и это значительно повышает уровень безопасности при эксплуатации лифтовых установок.

ПАК ВИК лифтовых канатов исключает риски, связанные с психофизическим состоянием человека, определяющего состояние системы. Таким образом можно повысить безопасность эксплуатации лифтового оборудования.

Достоинства разрабатываемого ПАК ВИК лифтовых канатов:

– функционирование в автоматическом режиме, непосредственно в эксплуатируемом лифте;

– бесконтактное обнаружение браковочных показателей с помощью фото- и видеонаблюдения (машинное зрение);

– автоматическая оценка браковочных показателей по пяти критериям в режиме онлайн (обрывы наружных проволок, поверхностный износ, местное увеличение или уменьшение диаметра каната, волнистость, температурное воздействие);

– передача на мобильное приложение пользователя браковочных показателей в цветовой кодировке;

– обработка изображений с дефектами стальных канатов искусственным интеллектом.

Потенциальные потребители ПАК ВИК:

– эксплуатанты — организации, ответственные за техническое состояние лифтов;

– товарищества собственников жилья, управляющие компании;

– производители, покупатели и продавцы пассажирских лифтов.

Список литературы

1. Снижение риска возникновения и тяжести последствий несчастных случаев при авариях лифтов / А. В. Панфилов, В. П. Колганов, О. А. Бахтеев [и др.] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2020. — № 3. — С. 451–460. https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-03-451-460

2. РД РОСЭК 012–97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки / А. А. Короткий, М. Н. Хальфин, Б. Ф. Иванов [и др.]. — Новочеркасск : РОСЭК, 1997. — 50 с.

3. Mouradi, H. Steel Wire Ropes Failure Analysis: Experimental Study / H. Mouradi, A. E. Barkany, A. E. Biyaali // Engineering Failure Analysis. — 2018. — Vol. 91. — P. 234–242. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.019

4. Deyst, J. P. Bounds on Least-Squares Four-Parameter Sine-Fit Errors due to Harmonic Distortion and Noise / J. P. Deyst, M. Sounders, O. M. Solomon // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 1995. — Vol. 44. — P. 637–642. 10.1109/19.387298

5. Soucup, D. Convolutional Neural Networks for Steel Surface Defect Detection from Photometric Stereo Images. In: Advances in Visual Computing. ISVC 2014. / D. Soukup, R. Huber-Mörk // Lecture Notes in Computer Science. — 2014. — Vol. 8887. — P. 668–677. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14249-4_64

6. Vallan, A. A Vision-Based Technique for Lay Length Measurement of Metallic Wire Ropes / A. Vallan, F. Molinar // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2009. — Vol. 58. — P. 1756–1762. 10.1109/TIM.2009.2012953

7. On the Suitability of Different Features for Anomaly Detection in Wire Ropes. In: Computer Vision, Imaging and Computer Graphics: Theory and Applications. Ranchordas, A., et al. (eds.) / E.-S. Platzer, H. Süße, J. Nägele [et al.] // VISIGRAPP 2009 : Communications in Computer and Information Science. — 2009. — Vol. 68. — P. 296–308. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11840-1_22

8. One-Class Classification for Anomaly Detection in Wire Ropes with Gaussian Process in a Few Lines of Code / E. Rodner, E.-S. Wacker, M. Kemmler, J. Denzler // In: Proc. 12th IAPR Conference on Machine Vision Applications. — URL: https://www.researchgate.net/publication/232805478_OneClass_Classification_for_Anomaly_Detection_in_ Wire_Ropes_with_Gaussian_Processes_in_a_Few_Lines_of_Code (accessed: 29.09.2022).

9. Surface Damage Detection for Steel Wire Ropes Using Deep Learning and Computer Vision Techniques / Xinyuan Huang, Zhiliang Liu, Xinyu Zhang [et al.] // Measurement. — 2020. — Vol. 161. — Art. 107843. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107843

10. Evolution Properties of Tribological Parameters for Steel Wire Rope under Sliding Contact Conditions / Xiangdong Chang, Yuxing Peng, Sheng-Yong Zou, Zhen-Cai Zhu // Metals. — 2018. — Vol. 8. — P. 743. 10.3390/met8100743

Поступила в редакцию 31.10.2022.
Поступила после рецензирования 18.11.2022.
Принята к публикации 18.11.2022.

Об авторах:

Панфилов Алексей Викторович, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, panfilov@ikcmysl.ru

Юсупов Александр Рашидович, старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, temple_black@mail.ru

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, korot@novoch.ru

Иванов Борис Федорович, ведущий научный сотрудник Центра научных компетенций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, ivanov@ikc-mysl.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Панфилов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формулирование выводов. А. А. Короткий — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Б. Ф. Иванов — анализ аварий и инцидентов, написание и редактирование текста. А. Р. Юсупов — реализация аппаратной и программной частей, проведение испытаний, обработка результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







Check for updates

УДК 620.179.17
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-331-337

Научная статья

Акустико-эмиссионный способ диагностики конструкций из композиционных материалов на основе инвариантов


А. В. Попов ✉, В. Ю. Волошина, К. А. Журавский, М. А. Лабина

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а

✉ avpnil@rambler.ru

Аннотация

Введение. Композиционные материалы являются основным способом уменьшения массы конструкции летательного аппарата и повышения его летно-технических характеристик. Методы неразрушающего контроля позволяют оценить техническое состояние композиционных материалов, а также определить концентраторы напряжений в них с целью принятия решения о дальнейшей эксплуатации данного объекта контроля. В работе представлен анализ применения композиционных материалов в конструкции летательных аппаратов и способы повышения их летно-технических характеристик за счет применения композитов. Описан акустико-эмиссионный способ оценки трещиностойкости на основе инвариантов. Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов за счет применения акустико-эмиссионного метода неразрушающего контроля.

Материалы и методы. Приведена номенклатура применяемых композиционных материалов в летательных аппаратах и произведено сравнение их физико-механических свойств. Использован акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля композиционных материалов на основе инвариантных соотношений.

Результаты исследования. Разработан способ оценки трещиностойкости силовых элементов конструкций на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов и программно-аппаратный комплекс на его основе.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при определении прочностных характеристик композиционных материалов акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля для проведения оценки технического состояния силовых элементов конструкций в машиностроении, судостроении и авиастроении. Статья рекомендована научным сотрудникам, занимающимся разработкой летательных аппаратов.

Ключевые слова: композиционные материалы, летательный аппарат, неразрушающий контроль, акустико-эмиссионный контроль.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке программы «УМНИК» Российского Фонда содействия инновациям.

Для цитирования. Акустико-эмиссионный способ диагностики конструкций из композиционных материалов на основе инвариантов / А. В. Попов, В. Ю. Волошина, К. А. Журавский, М. А. Лабина // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 331–337. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-331-337

Original article

Acoustic Emission Method of Diagnostics of Structures Made of Composite Materials Based on Invariants

Alexey V. Popov ✉, Valentina Yu. Voloshina, Konstantin A. Zhuravsky, Maria A. Labina

Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy", 54a, Starykh Bol'shevikov St., Voronezh, Russian Federation

✉ avpnil@rambler.ru

Abstract

Introduction. Composite materials are the main way to reduce the weight of the aircraft structure and improve its flight performance. Methods of non-destructive testing enable to assess the technical condition of composite materials, as well as to determine stress concentrators in them to make a decision on the further operation of this control object. The paper presents an analysis of the use of composite materials in the aircraft design and ways to improve their flight performance through the application of composites. An acoustic-emission method for assessing crack resistance based on invariants was described. The study aimed at increasing the accuracy and efficiency of assessing the crack resistance of aircraft structures made of composite materials through the use of the acoustic emission method of non-destructive testing.

Materials and Methods. The nomenclature of composite materials used in aircraft was given, and their physical and mechanical properties were compared. The acoustic emission method of non-destructive testing of composite materials based on invariant ratios was used.

Results. A method for assessing the crack resistance of primary structural elements based on the invariants of acoustic emission processes, and a program apparatus complex based on it has been developed.

Discussion and Conclusions. The results obtained can be used to determine the strength characteristics of composite materials by the acoustic emission method of non-destructive testing to assess the technical condition of primary structural elements in mechanical engineering, shipbuilding, and aircraft construction. The paper is recommended to researchers involved in the development of aircraft.

Keywords: composite materials, aircraft, non-destructive testing, acoustic emission control.

Acknowledgments. The research was carried out with the support of the "UMNIK" program of the Russian Foundation for the Promotion of Innovation.

For citation. A. V. Popov, V. Yu. Voloshina, K. A. Zhuravsky, M. A. Labina. Acoustic Emission Method of Diagnostics of Structures Made of Composite Materials Based on Invariants. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 331–337. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-331-337

Введение. Повышение летно-технических характеристик (ЛТХ) и снижение веса конструкций летательных аппаратов при сохранении их достаточной прочности и жесткости является основополагающей задачей в авиастроительной области [1, 2]. Внедрение композиционных материалов (КМ) частично позволяет решить данную задачу.

Разработчики летательных аппаратов (ЛА) постоянно внедряют в авиационную технику новые материалы для повышения ЛТХ и снижения массы конструкции. КМ позволяют снизить массу крыла, фюзеляжа и оперения. Высокие физико-механические свойства КМ повышают жесткость и прочность конструкции.

К основным преимуществам КМ относят высокие значения удельной прочности, жёсткости (модуль упругости 130–140 ГПа), износостойкости и усталостной прочности [1, 2] [3, 4]. К недостаткам КМ относят гигроскопичность, значительную стоимость, анизотропию свойств, низкую ударную вязкость, низкую эксплуатационную технологичность.

Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости конструкций из композиционных материалов за счет применения акустико-эмиссионного (АЭ) контроля.

Материалы и методы. В авиастроении применяется широкий спектр КМ [1, 4] (рис. 1), за счёт которых можно облегчать вес конструкций. Это достигается путем замены элементов, выполненных из традиционных материалов (сплавы титана и алюминия, стали), на КМ.

[1] Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. ПБ 03–593–03 / Гостехнадзор России. М.: ПИО ОБТ. 2003. 102 с. // files.stroyinf.ru : [сайт]. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294816/4294816759.htm (дата обращения : 28.09.2022)..

[2] Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии // Неразрушающий контроль. Справочник в 8т. Т 7. Кн.1. / Под общ. ред. В. В. Клюева. М : Машиностроение. 2006. 340 с.

Перед предприятиями авиационной промышленности стоят две важные задачи:

– оценить процессы накопления повреждений и разрушений конструкций из КМ во всем диапазоне знакопеременных нагрузок;

– оценить качество серийной продукции из КМ путем проведения прочностных испытаний.

В основном выделяют следующие схемы разрушения КМ (рис. 1):

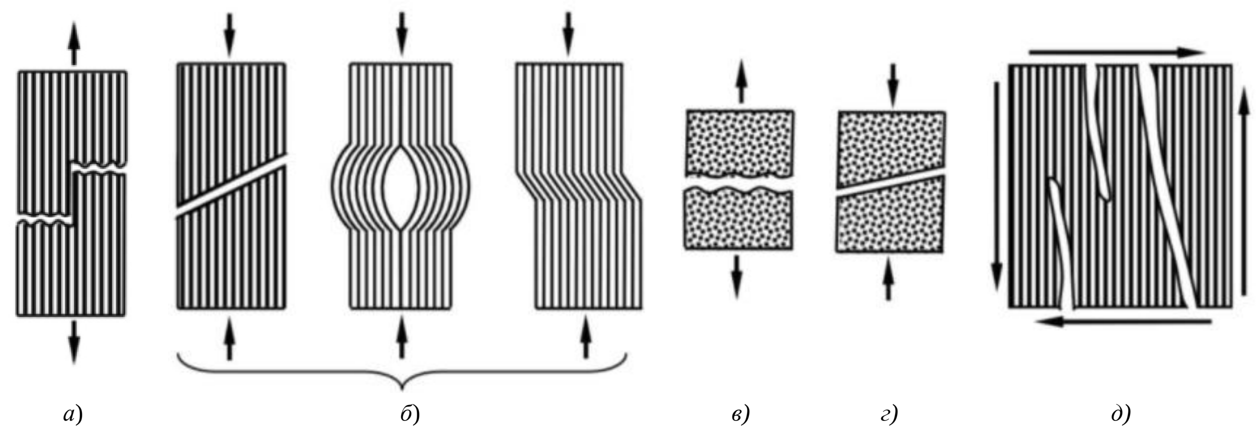


Рис. 1. Схемы разрушения композиционных материалов: *а* — при растяжении вдоль волокон; *б* — при сжатии вдоль волокон; *в* — при растяжении поперёк волокон; *г* — вызванное сдвиговыми напряжениями при сжатии поперек волокон; *д* — расслоение материала, вызванное сдвиговыми напряжениями (рисунок авторов)

В настоящее время особое место среди методов диагностирования конструкций ответственного назначения занимает акустико-эмиссионный (АЭ) метод НК.

Метод АЭ основан на регистрации акустических волн, излучаемых при разрушении КМ. К основным преимуществам данного метода относят [5–11]:

– комплексный характер исследования КМ (механика разрушения и акустическая диагностика);

– регистрация развивающихся дефектов КМ;

– высокая чувствительность к растущим дефектам КМ (чувствительность АЭ аппаратуры порядка 1×10^{-6} мм^2 для трещины КМ протяженностью 1 мкм);

– использование нескольких преобразователей;

– дистанционный контроль объектов при значительном удалении от АЭ аппаратуры.

АЭ в КМ представляет собой нестационарный случайный процесс излучения упругих волн. Исходя из этого, для обработки и анализа таких процессов могут применяться методы статической радиотехники. На основе пуассоновского распределения выполняется известное равенство между математическим ожиданием и дисперсией количества событий в случайном процессе:

$$m[x] = D[x] = \lambda, \tag{1}$$

где λ — интенсивность числа импульсов на заданном интервале выборки.

Это соотношение позволяет построить параметрические инварианты, справедливые только для пуассоновского процесса, и на этой основе оценить отклонение анализируемого процесса от пуассоновского [5, 6, 12, 13]:

$$I_1 = (m[x^3] - 3 \cdot m[x^2] \cdot m[x] + (m[x])^3) - m[x] = 0. \tag{2}$$

Выражение (15) может использоваться как инвариант количества импульсов АЭ для определения степени отклонения потока АЭ импульсов от пуассоновского при проведении АЭ испытаний КМ.

На основании (15) получим еще несколько выражений для определения степени отклонения потока импульсов АЭ от пуассоновского:

$$I_2 = \frac{m[x]}{m[\dot{x}^3]} = 1; \tag{3}$$

$$I_3 = \frac{m[x]\left(1-2\cdot\left(m[x]^2\right)+3\cdot m[x^2]\right)}{m[x^3]} = 1. \tag{4}$$

При образовании макродефекта характеристики потоков импульсов АЭ становятся зависимыми, что разрушает гипотезу пуассоновского потока и приводит к нарушению равенств (2–4).

Данный подход реализован в программно-аппаратном комплексе (ПАК) (рис. 2), который позволяет идентифицировать трещиноподобные дефекты в различных КМ [12, 13].

ПАК состоит из следующих компонентов:

– широкополосные пьезодатчики GT300, рабочий диапазон частот —100–800 кГц, резонансная частота 283 кГц;

– усилитель GT200A, коэффициент усиления — 1–200, пределы допускаемой дополнительной относительной погрешности коэффициента преобразования по заряду в рабочем диапазоне температур составляют от –40 °до + 85 °С с погрешностью ± 1 %;

– АЦП Е20-10 — быстродействующий модуль АЦП с наличием USB интерфейса для подключения к ПК, который имеет 4 канала АЦП 14 бит/10 МГц с функцией мультиплексирования, 16 каналов цифрового ввода и вывода, совместимые с TTL логикой, а также 2 канала ЦАП 12 бит/ ±5 В;

– ПЭВМ, ВЧ кабели.

Точность и достоверность регистрации и обработки АЭ обеспечивается частотными параметрами пьезодатчиков и АЦП, которые согласуются с теоремой Котельникова, которая гласит о том, что непрерывный сигнал с ограниченным спектром можно точно восстановить по его дискретным отсчётам, если они были взяты с частотой дискретизации, превышающей максимальную частоту сигнала минимум в два раза.

В ПАК используется программная амплитудная пороговая фильтрация, а также способ сглаживания резонансной амплитуды затухания импульсов на основе цифрового пикового детектора, позволяющий получить экспоненциальное сглаживание формы импульсов АЭ для повышения точности их регистрации.

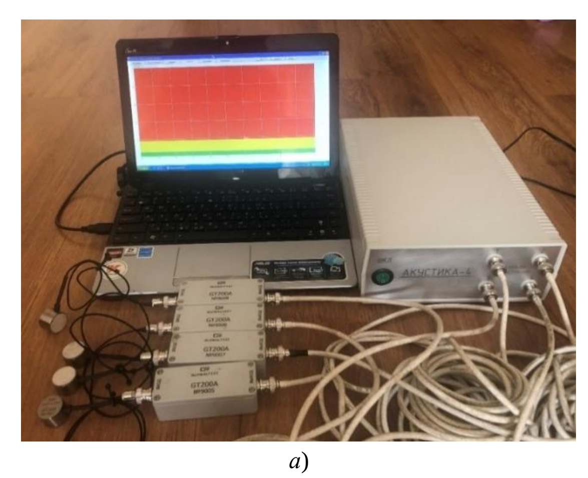
Для комплексного анализа в реальном масштабе времени множества информативных параметров сигналов АЭ разработана методика оценки многопараметрической информации, основанная на объединении («свёртки») информативных параметров АЭ методами теории исследования операций.

Разработанная программная реализация методики имеет следующие основные функциональные режимы: настройка, проверка функционирования, ввод ограничений и исходных данных, наблюдение за изменением нагрузок, деформаций и осциллограмм импульсов АЭ, комплекс информативных параметров АЭ и их «свёртки» по каналам регистрации, определение местоположения дефектов, оценка опасности дефектов и возможности дальнейшей эксплуатации конструкции, хранение результатов.

Так как АЭ является пассивным методом неразрушающего контроля, один пьезодатчик может регистрировать сигналы с отдельного силового элемента ЛА (рис. 2 *б*).

От материала, профиля и толщины испытуемых образцов зависит затухание упругих волн, что определяет количество используемых пьезопреобразователей и расстояние между ними. Затухание сигналов определяется опытным путём при помощи имитатора АЭ сигналов перед проведением испытаний образцов и элементов конструкций.

Для локализации дефектов за основу был взят триангуляционный метод [3,4], что позволяет определять в силовых элементах конструкций местоположение дефектов в реальном масштабе времени с точностью до 0,1 м.



а)



б)

Рис. 2. Программно-аппаратный комплекс акустико-эмиссионной диагностики: *а* — комплекс в сборе; *б* — размещение датчика комплекса при испытаниях элерона летательного аппарата на стенде (фото авторов)

Результаты исследования. Для оценки достоверности предложенного метода инвариантов и чувствительности ПАК к оценке развивающихся дефектов были проведены прочностные испытания серии образцов КМ КМУ-1В до разрушения. Нагрузка осуществлялась разрывной машиной РМ-1. Перед началом испытаний на растяжение до разрушения на поверхность образца устанавливался пьезоэлектрический датчик

[3] ПБ 03–593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов / Гостехнадзор России. 2003. 102 с.

[4] Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. 2-е изд., испр. Москва : Машиностроение, 2006. 829 с.

через слой контактной смазки (Циатим) для улучшения акустического контакта. В ходе испытаний регистрировались акустические импульсы, возникающие в структуре ОК при создании нагрузки. Упругие волны АЭ регистрировались пъезодатчиком, затем сигнал усиливался предусилителем, аналого-цифровой преобразователь трансформировал сигнал в аналого-цифровой вид для последующей обработки на ПЭВМ. Результаты изображены на рис. 3:

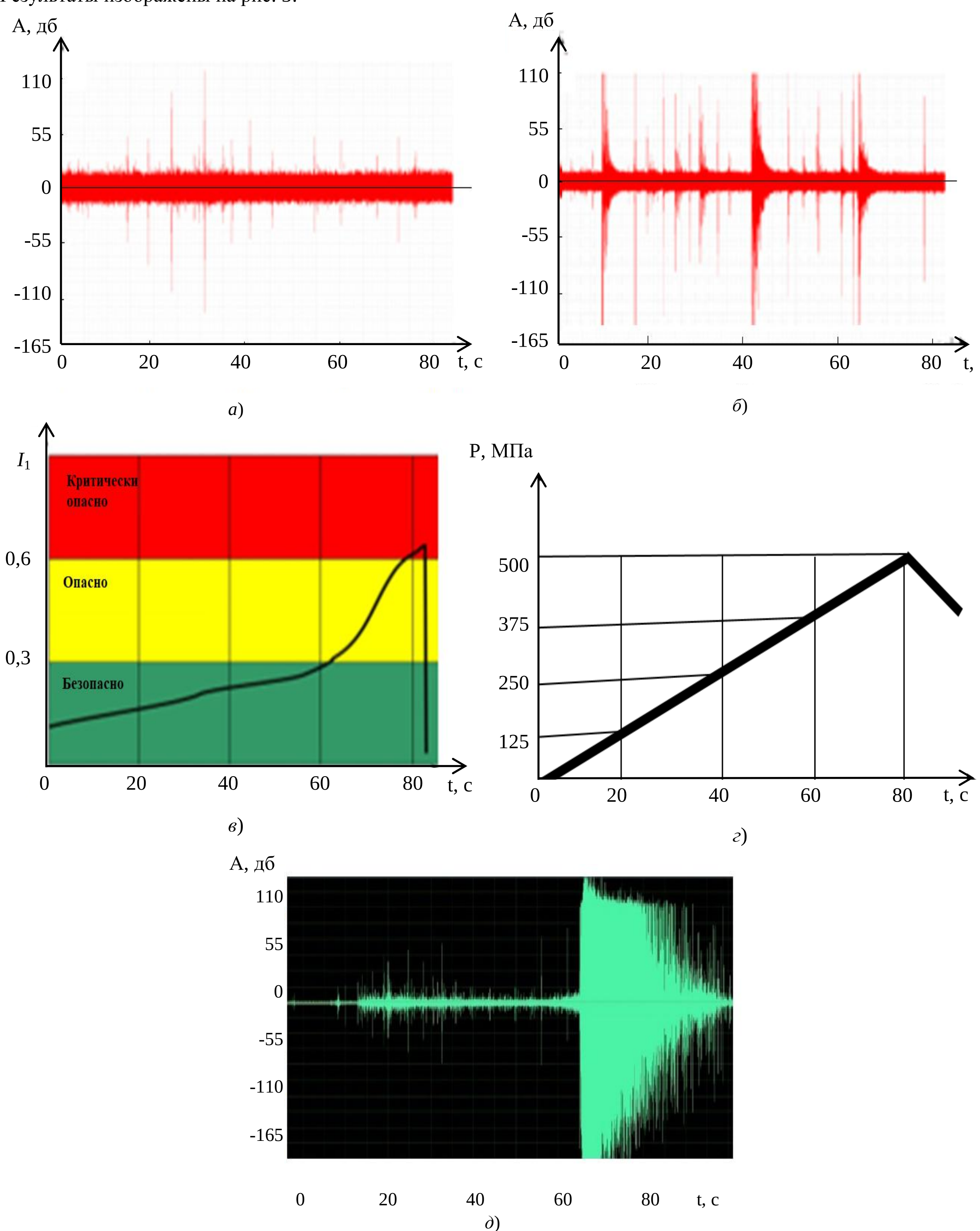


Рис. 3. Результаты проведения экспериментов до разрушения образцов:
а — осциллограмма импульсов АЭ при разрушении матрицы композиционного материала; *б* — осциллограмма импульсов АЭ при разрушении волокон композиционного материала; *в* — кривая инварианта I_1; *г* — кривая нагружения силового элемента планера из КМ; *д* — осциллограмма АЭ сигнала от начала нагрузки до разрушения образца (рисунок авторов)

На рис. 3 *а* и *б* представлены осциллограммы импульсов АЭ при разрушении матрицы и волокон композиционного материала, в которых максимальные значения амплитуды (А) АЭ сигнала соответствуют разрушению ОК. При значениях амплитуды 55 Дб происходит разрушение матрицы КМ, при 75 Дб — волокон КМ.

На рис. 3 *в* изображена зависимость инварианта от времени I_1 (нагрузки). Зеленая зона характеризуется отсутствием дефекта в силовом элементе планера. Желтая зона характеризуется неблагоприятной средой нагружения ОК, образованием развивающихся дефектов (трещин, расслоений). Красная зона соответствует разрушению КМУ-1В.

С 60 секунды нагружения при нагрузке 375 МПа происходит образование магистральной трещины (рис. 3 *г*), что приводит к выходу инварианта из зелёной (безопасной) зоны. Данные условия соответствуют 75 % разрушающей нагрузки (350 МПа) образцов. Достоверность применения инвариантов подтверждается резким увеличением амплитуды и интенсивности сигналов (рис. 3 *д*), результатами оптического контроля при испытаниях.

При нагрузке P=500 МПа происходит разрушение КМ в момент времени равный T=80 с, что вызывает уменьшение нагрузки и амплитуды акустических колебаний в материале ОК.

Обсуждение и заключения. Данный эксперимент отражает проведение акустико-эмиссионного контроля образцов (силовых элементов конструкций) из КМ КМУ-1В.

Разработанный ПАК на основе предложенного метода инвариантов позволяет оперативно (в реальном масштабе времени) обрабатывать многоканальную и многопараметрическую информацию об изменении информативных параметров АЭ и определять местоположение дефектов в КМ, оценивать степень опасности дефектов и возможность дальнейшей эксплуатации конструкций [12, 13].

В перспективе предлагается внедрение подобных автоматических систем контроля для осуществления диагностирования конструкции летательных аппаратов в полете и при наземном обслуживании.

Список литературы

1. Козлов, Д. М. Проектирование узлов авиационных конструкций / Д. М. Козлов; под. ред. В. А. Комарова. — Самара : Изд-во Самарского университета, 2017. — 96 с.

2. Гишваров, А. С. Анализ эксплуатационных разрушений летательных аппаратов и двигателей / Д. М. Козлов. — Уфа : УГАТУ, 2003. — 289 с.

3. Махутов, Н. А. Применение технической диагностики для расчета вероятности разрушения технических устройств и оценки риска аварии / Н. А. Махутов, В. И. Иванов, В. В. Мусатов // Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 9. — С. 53–64. 10.24000/0409-2961-2018-9-53-64

4. Андриевский, Р. Л. Наноструктурные материалы / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. — Москва : Академия, 2005. — 192 с.

5. Буйло, С. И. Вероятностно-информационный подход к оценке достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики / С. И. Буйло, Б. И. Буйло, М. И. Чебаков // Дефектоскопия — 2021. — № 5. — С. 37–44.

6. Буйло, С. И. Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов / С. И. Буйло // Дефектоскопия. — 2018. — № 4. — С. 18–23.

7. Zhang, F. Statistical Model and Analysis of AE Data from Aircraft / F. Zhang, G. Wu, Z. Wang // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. — 2001. — Vol. 43. — P. 531–536.

8. Zheng, G. T. Blind Deconvolution of Acoustic Emission Signals for Damage Identification in Composites / G. T. Zheng, M. Backley, G. Kister // AIAA Journal. — 2001. — Vol. 39. — P. 1198–1205. https://doi.org/10.2514/2.1435

9. Skalskyi, V. R. Some Methodological Aspects of Application of Acoustic Emission / V. R. Skalskyi, P. M. Koval // Lviv: Spolom; 2007. — 336 p.

10. Maochen Ge. Analysis of Source Location Algorithms, Part I: Overview and Non-Iterative Methods / Maochen Ge // Journal of Acoustic Emission. — 2003. — Vol. 21. — P. 14–28.

11. Barat, V. Detection of AE Signals against Background Friction / V. Barat, Y. Borodin, A. Kuzmin // Journal of Acoustic Emission. — 2011. — Vol. 29. — P. 133–141.

12. Методы и средства акустико-эмиссионной диагностики силовых элементов планера воздушных судов / А. В. Попов, А. Б. Комлев, А. О. Самуйлов, П. В. Закусилов // В мире неразрушающего контроля. — 2021. — Т. 24, № 2. — С. 50–52. 10.12737/1609-3178-2021-52-54

13. Попов, А. В. Акустико-эмиссионный способ диагностики силовых элементов планера воздушных судов на основе инвариантов / А. В. Попов, В. Ю. Волошина, А. О. Самуйлов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2021. — Т. 25, № 3. — С. 50–55. 10.54708/19926502_2021_2539350

Поступила в редакцию 19.09.2022.
Поступила после рецензирования 20.10.2022.
Принята к публикации 20.10.2022.

Об авторах:

Попов Алексей Владимирович, профессор кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), доктор технических наук, доцент, avpnil@rambler.ru, ORCID

Волошина Валентина Юрьевна, старший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), кандидат экономических наук, tolkoradinauki@mail.ru, ORCID

Журавский Константин Александрович, адъюнкт кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), tolkoradinauki@mail.ru, ORCID

Лабина Мария Алексеевна, инженер ООО «Синтез технологий», (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), Labina1310@rambler.ru, ORCID

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Попов — разработка метода инвариантов, научное руководство исследованиями. В. Ю. Волошина — проведение и анализ результатов исследований, оформление статьи. К. А. Журавский — разработка и описание программно-аппаратного комплекса. М. А. Лабина — анализ композиционных материалов и летно-технических характеристик летательных аппаратов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 621.762.002
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-338-345

Научная статья



Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем

В. А. Лебедев, А. А. Ширин ✉, Н. С. Коваль, Ю. М. Вернигоров
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ ANDREY.SHIRIN.94@yandex.ru

Аннотация
Введение. Ключевыми этапами технологии переработки шламов являются разрушение конгломератов на металлические и неметаллические компоненты, а также измельчение частиц компонентов для получения вторичного сырья требуемого гранулометрического состава. Применение вращающегося электромагнитного поля для переработки шлифовальных шламов позволяет исключить применение различных средств разрушения и измельчения, избегая контактного взаимодействия агломератов со стенками рабочей камеры. Таким образом снижается материалоёмкость технических средств и повышается эффективность процесса разрушения. Целью исследований являлось установление особенностей и основных закономерностей переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.
Материалы и методы. Для исследований использовался шлифовальный шлам, представляющий собой совокупность конгломератов произвольной формы, состоящих на 80–85 % из металлической стружки. Применен индукционный метод, основанный на установлении связи ЭДС, наводимой в индукционном датчике с магнитной индукцией вращающегося электромагнитного поля. Оценка влияния индукции на характер взаимодействия между частицами шлама во вращающемся электромагнитном поле проводилась по изменению относительного сигнала ЭДС, наведенного в индуктивном датчике.
Результаты исследования. В результате проведенных с применением индукционного метода экспериментальных исследований установлено: динамические характеристики конгломератов шламовых отходов зависят от индукции вращающегося поля до определенной величины; с увеличением размера конгломератов шлама, при одинаковом размере входящих в него ферромагнитных частиц, величина индукции магнитного поля, необходимая для их разрушения, снижается; с уменьшением размеров частиц конгломератов индукция поля, необходимая для разрушения связей конгломерата, увеличивается; увеличение числа частиц в конгломерате снижает значение индукции; степень разрушения конгломерата и измельчения его ферромагнитных частиц зависит от продолжительности воздействия индукции вращающегося электромагнитного поля.
Обсуждение и заключения. Предложенный индукционный метод позволяет исследовать влияние параметров электромагнитного поля на изменение состояния магнитовибрирующего слоя, а также оценить кинематические характеристики частиц ферромагнитной среды в магнитовибрирующем слое.

Ключевые слова: шлифовальный шлам, индукция, магнитовибрирующий слой, вращающееся электромагнитное поле, конгломерат, ферромагнитные частицы, разрушение, измельчение.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90006.

Благодарности. Авторы благодарят руководителей предприятий Ростовской области: ПАО «ТАНТК им. Г. М. Бериева», ОАО «10-ГПЗ» за предоставленные образцы шламовых отходов шлифовального производства.

Для цитирования. Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем / В. А. Лебедев, А. А. Ширин, Н. С. Коваль, Ю. М. Вернигоров // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 338–345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-338-345

Original article

Study on Processing Grinding Sludge Conglomerates in Devices with a Rotating Electromagnetic Field

Valeriy A. Lebedev, Andrey A. Schirin ✉, Nikolay S. Koval, Yuri M. Vernigorov
Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ ANDREY.SHIRIN.94@yandex.ru

Introduction. The key stages of sludge processing technology are the destruction of conglomerates into metal and non-metal components, as well as the grinding of component particles to obtain secondary raw materials of the required granulometric composition. The use of a rotating electromagnetic field for processing grinding sludge makes it possible to exclude the application of various means of destruction and grinding, avoiding contact interaction of agglomerates and the walls of the working chamber. Thus, the material consumption of technical means is reduced, and the efficiency of the destruction process is increased. The study aimed at establishing the features and basic patterns of sludge waste processing in devices with a rotating electromagnetic field.

Materials and Methods. For the research, grinding sludge was used, which was a collection of conglomerates of arbitrary shape, consisting of 80-85 % of metal chips. An induction method was applied based on establishing the connection of the EMF induced in an induction sensor and the magnetic induction of a rotating electromagnetic field. The influence of induction on the nature of interaction between sludge particles in a rotating electromagnetic field was evaluated by changing the relative EMF signal induced in an inductive sensor.

Results. As a result of experimental studies conducted using the induction method, it has been found that the dynamic characteristics of sludge waste conglomerates depend on the induction of a rotating field to a certain value. With an increase in the size of sludge conglomerates, with the same size of ferromagnetic particles entering it, the magnitude of the magnetic field induction required for their destruction decreased. With a decrease in the particle size of conglomerates, the field induction required for the destruction of conglomerate bonds increased. An increase in the number of particles in the conglomerate reduced the value of induction. The degree of destruction of the conglomerate and the grinding of its ferromagnetic particles depended on the duration of the rotating electromagnetic field induction.

Discussion and Conclusions. The proposed induction method makes it possible to investigate the influence of electromagnetic field parameters on the change in the state of the magnetic vibrating layer, as well as to evaluate the kinematic characteristics of ferromagnetic medium particles in the magnetic vibrating layer.

Keywords: grinding sludge, induction, magnetic vibrating layer, rotating electromagnetic field, conglomerate, ferromagnetic particles, destruction, grinding.

Funding information. The research is done with the financial support from RFFI within the framework of scientific project no. 20-38-90006.

Acknowledgements. The authors would like to thank the heads of enterprises of the Rostov region: PJSC "Beriev Aircraft", OAO "10-GPZ", for the samples of slurry waste of grinding production provided.

For citation. V. A. Lebedev, A. A. Schirin, N. S. Koval, Yu. M. Vernigorov. Study on Processing Grinding Sludge Conglomerates in Devices with a Rotating Electromagnetic Field. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 338–345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-338-345

Введение. Технология переработки одного из самых сложных видов отходов металлопроизводства — шлифовального шлама — с целью вторичного использования его компонентов в порошковой металлургии и литейном производстве требует выполнения ряда последовательных этапов: отделение технологической жидкости (ТЖ), сушка, разрушение конгломератов, измельчение и разделение твёрдых частиц шлама [1–10]. Последние два этапа переработки шламов, как показал проведённый анализ, являются наиболее трудоемкими, а

применяемые для их реализации технические средства и устройства, несмотря на их многообразие, малоэффективны по ряду технико-экономических показателей [1–15]. Последние достижения в области магнетизма позволяют решить эту проблему на качественно новом уровне, используя вращающееся электромагнитное поле (рис. 1).

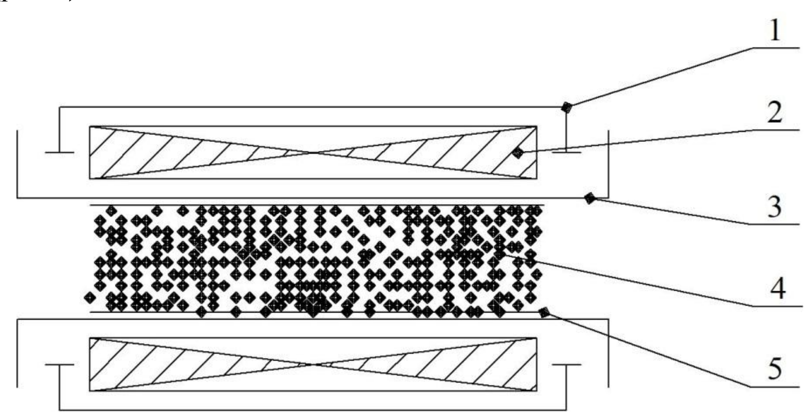


Рис. 1. Схема переработки шлама во вращающемся электромагнитном поле:
1 — корпус; 2 — индуктор; 3 — рабочая зона ; 4 — шлам; 5 — сменная втулка (рисунок авторов)

Применение вращающегося электромагнитного поля (ВЭМП) для переработки шлифовальных шламов позволяет исключить контактное взаимодействие конгломератов со стенками рабочей камеры и применение металлических бил или других средств разрушения и измельчения. Таким образом снижается материалоёмкость технических средств, повышается эффективность процессов разрушения конгломератов и измельчение металлических частиц шлама [16, 17].

С целью раскрытия особенностей и основных закономерностей переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых представлены в данной статье.

Материалы и методы. Шлам, подлежащий разрушению и измельчению, представляет собой совокупность конгломератов произвольной формы, состоящих на 80–85 % из металлической стружки, что позволяет охарактеризовать конгломерат как твердое тело, обладающее ферромагнитными свойствами [14].

При нахождении конгломератов во вращающемся электромагнитном поле, характеризуемом индукцией $B{=}B\text{v}cos\omega t$ и угловой скоростью ω, они совершают сложное движение, приводя систему в магнитовибрирующее состояние. При этом формируется магнитовибрирующий слой (МВС), в условиях которого происходит их контактное взаимодействие и, как следствие, разрушение и измельчение.

Энергетическое состояние конгломератов в магнитовибрирующем слое описывается зависимостью в виде:

$$E = \frac{1}{2\pi}\frac{\rho_m{}^2}{\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right], \text{Дж}, \quad (1)$$

где p_m — магнитный момент; Ам^2; $\frac{dB}{dy}$ — градиент поля, А/м^2.

На основе уравнения (1) установлены энергетические условия разрушения конгломератов:

$$\frac{\rho_m{}^2}{\pi\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right] = E_{\text{адг}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{адг}}$ — адгезионная прочность конгломератов, Дж.

Условие измельчения ферромагнитных частиц шлама со степенью $Z_u = D_{\text{Н}}/D_{\text{К}}$ исходя из (1) имеет вид:

$$\frac{1}{2\pi}\frac{\rho_m{}^2}{\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right] + \frac{1}{2\pi}\frac{\rho_M{}^2}{\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{M}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right] = \frac{\pi\sigma^2 D_{\text{к}}^3}{12E}(Z_u^3 - 1), \quad (3)$$

где σ — предел прочности при разрушении феромагнитных частиц; Па; $D_н$ и $D_к$ — начальный и конечный эквивалентные диаметры частиц, м; Е — модуль упругости частицы, Па.

Для проведения исследований влияния электромагнитного поля на энергетическое состояние магнитовибрирующего слоя был применен индукционный метод (рис. 2), основанный на установлении связи ЭДС, наводимой в индукционном датчике с магнитной индукцией вращающегося электромагнитного поля.

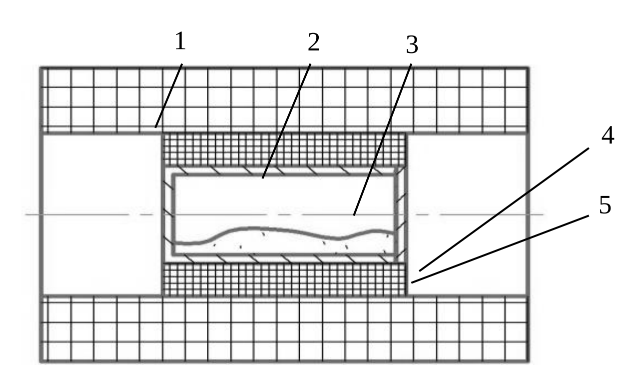


Рис. 2. Схема реализации исследований состояния магнитовибрирующего слоя во вращающемся электромагнитном поле индукционным методом: 1 — индуктор; 2 — индуктивная катушка; 3 — кювета; 4 — шлам; 5 — крышка кюветы (рисунок авторов)

В качестве датчика выбрана катушка индуктивности. Для создания катушки изготовлен каркас шириной (Н) 25 мм и наружным радиусом (R_2) 17,5 мм. Обмоточный провод — ПЭЛ (ГОСТ 2 773–78) с диаметрами: по меди D_1 = 0,15 мм, в изоляции D = 0,18 мм. Площадь сечения провода S = 0,01767 мм^2. Измеренное сопротивление катушки составило 14,8 Ом. Индуктивность — 0,82 мГн. Общее число витков — 139, длина провода — 15,27 м. Расчетное сопротивление катушки (1 м — 0,99 Ом) R = 15,27×0,99 = 15,1 Ом.

Индуктивный датчик 2 и кювета 3 помещались в цилиндрическую рабочую зону устройства с вращающимся электромагнитным полем (рис. 1). Ток в цепи индуктивного датчика контролировался мультиметром и при различных режимах составлял 4,3–11,4 А. Индукционная ЭДС измерялась вначале без частиц шламовых отходов, а затем с исследуемыми образцами шламовых отходов при выбранных параметрах устройства с ВЭМП.

Конгломераты шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле под действием момента, стремящегося повернуть их вокруг центра масс, совершают с одной стороны вращательное движение, с другой — поступательное в направлении движения внешнего вращающегося электромагнитного поля. Таким образом, поведение магнитных моментов конгломератов под действием пондеромоторных сил можно охарактеризовать в плоскости измерительного витка индукционного датчика XOY как колебательно-вращательное и колебательно- поступательное движение по гармоническому закону в магнитном поле (рис. 3).

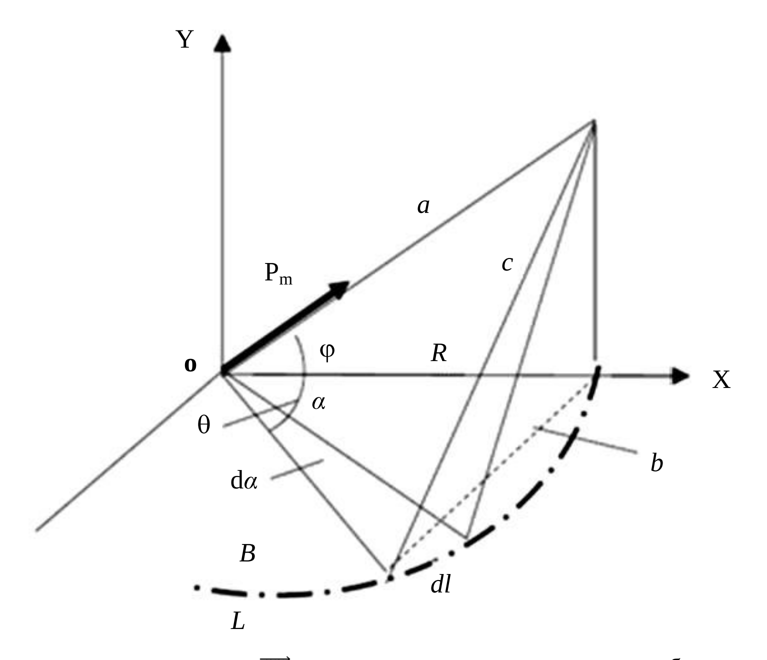


Рис. 3. Ориентация магнитного момента $\overrightarrow{p_m}$ в пространстве индукционного преобразователя (рисунок авторов)

Наведенная ЭДС, в соответствии с законом электромагнитной индукции, равна:

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}, \qquad (4)$$

где $\psi = N\Phi$ — потокосцепление; N — число витков измерительной катушки.

Выразим магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром витка индукционного преобразователя L с радиусом R, в следующем виде:

$$\Phi = BS_к, \tag{5}$$

где $S_к$ — площадь контура катушки; $S_к = \pi r^2$; r — средний радиус контура катушки, B — индукция вращающегося электромагнитного поля. При этом:

$$B = B_0. \tag{6}$$

Выражение для расчета ЭДС многовиткового индукционного преобразователя следующее:

$$\varepsilon = \frac{2}{3}\mathrm{N}B_0\pi^2R^2f_1. \tag{7}$$

Оценка влияния индукции на характер взаимодействия между частицами шлама во вращающемся электромагнитном поле проводилась по изменению относительного сигнала ЭДС, наведенного в индуктивном датчике, согласно соотношению:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0}, \tag{8}$$

где ε и ε_0 — ЭДС в датчике со средой и без неё соответственно.

Результаты исследования. На рис. 4, 5 представлены результаты исследования индукционным методом влияния вращающегося электромагнитного поля на энергетическое состояние частиц шлама, а на рис. 6–8 — основные технологические закономерности процесса разрушения конгломератов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.

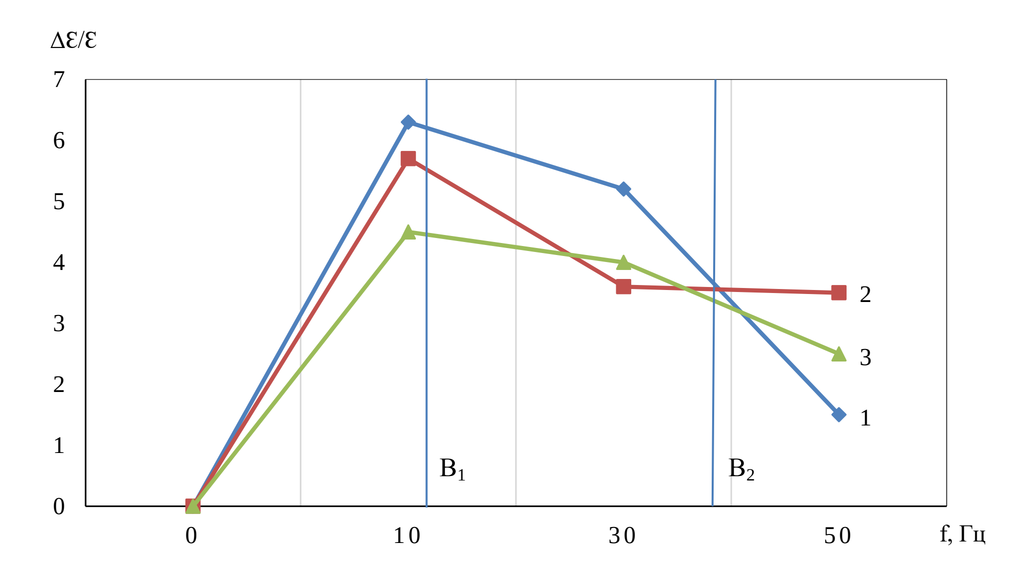


Рис. 4. Экспериментальная зависимость относительного сигнала $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ от частоты питающего тока (f), определяющего индукцию вращательного электромагнитного поля при уровне загрузки рабочей зоны устройства ферромагнитной средой: 1 — 30 %; 2 — 50 %; 3 — 75 % (рисунок авторов)

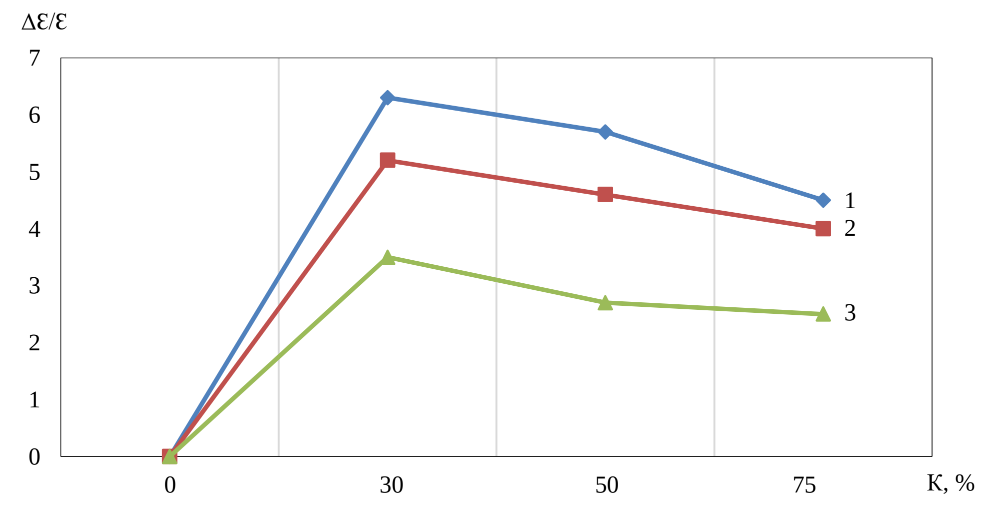


Рис. 5. Экспериментальная зависимость относительного сигнала Δε ⁄ε от коэффициента загрузки шлама в рабочую зону устройства с ВЭМП, определяющего индукцию вращательного электромагнитного поля: 1 — 10 Гц; 2 — 30 Гц; 3 — 50 Гц; (рисунок авторов)

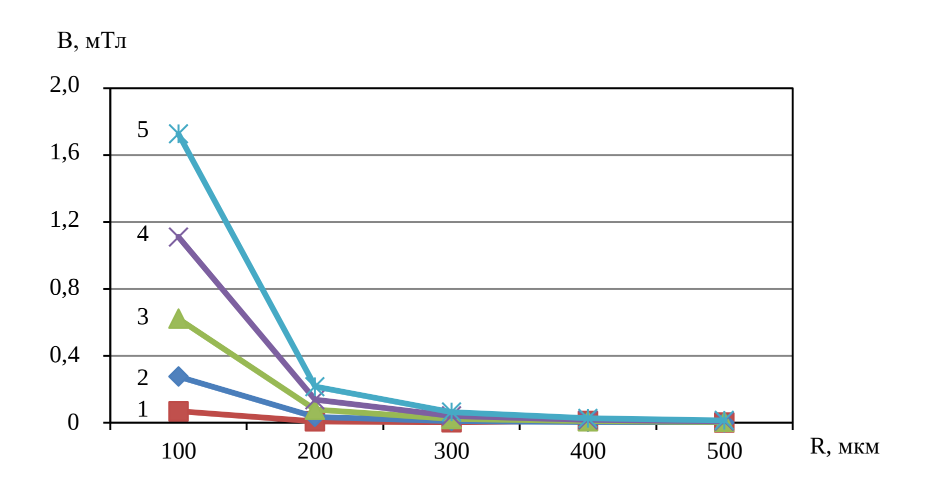


Рис. 6. Влияние размера конгломератов шлама на величину индукции магнитного поля, необходимой для их разрушения, при размере r частицы в конгломерате: 1 — 50 мкм; 2 — 40 мкм; 3 — 30 мкм; 4 — 20 мкм; 5— 10 мкм (рисунок авторов)

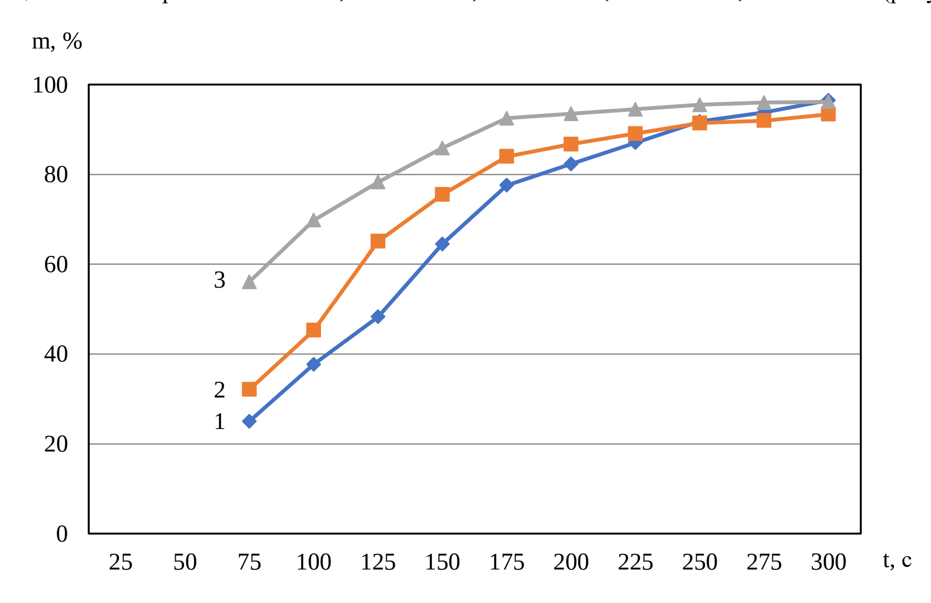


Рис. 7. Зависимость отделившегося абразива от времени при частотах выходного тока: 1 — 50 Гц; 2 — 30 Гц; 1 — 10 Гц (рисунок авторов)

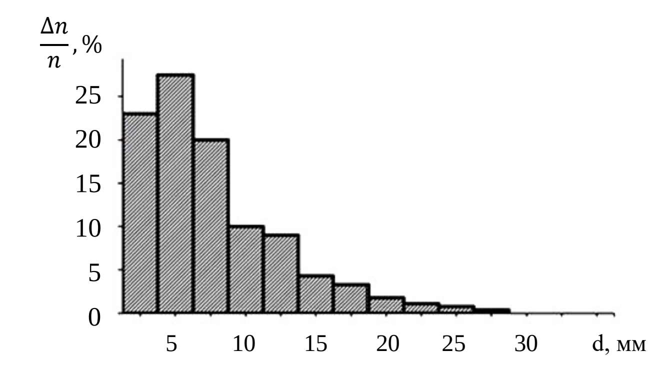


Рис. 8. Гистограмма распределения частиц по размерам через 5 минут воздействия магнитовибрирующего слоя (рисунок авторов)

Обсуждение и заключения. Проведенные с применением индукционного метода экспериментальные исследования наглядно показали, что динамические характеристики конгломератов шламовых отходов зависят от индукции вращающегося поля. Как показано на рис. 4, изменение индукции поля до значения B_1 способствует росту энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое. Процессы, обеспечивающие технологический эффект разрушения конгломератов шламовых отходов размером 10 мкм, протекают более интенсивно. Дальнейшее увеличение индукции от B_1 до B_2 приводит к снижению энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое, что и показал индукционный метод.

Это связано с тем, что при увеличении индукции уменьшается степень хаотизации конгломератов и из них начинают формироваться цепочные комплексы, образуя так называемые «магнитные струны», скорость и амплитуда колебаний которых меньше скорости и амплитуды колебаний отдельных конгломератов. При $B > B_2$ «магнитные струны» за счет роста магнитостатического взаимодействия принимают устойчивый характер, значительно снижающий эффект магнитовибрирования конгломератов шламовых отходов, практически сводя его к нулю при высоком уровне индукции вращающегося электромагнитного поля.

Результаты исследований, представленные на рис. 6–8, позволили сделать следующие выводы:

– с увеличением размера конгломератов шлама, при одинаковом размере входящих в него ферромагнитных частиц, величина индукции магнитного поля, необходимая для их разрушения, снижается, что согласуется с модельными представления энергетической оценки магнитовибрирующего слоя;

– с уменьшением размеров частиц конгломератов индукция поля необходимая, для разрушения связей конгломерата увеличивается; анализ кривых позволяет утверждать, что для конгломератов, состоящих из частиц радиусом менее 3 мкм, индукция превышает 2 – 4 мТл;

– предложенная модель для оценки энергетического состояния справедлива при разрушении менее устойчивых конгломератов;

– увеличение числа частиц в конгломерате снижает значение индукции, разрушающего его;

– степень разрушения конгломератов и измельчения его ферромагнитных частиц зависит от продолжительности воздействия индукции вращающегося электромагнитного поля.

Список литературы

1. Бабичев, А. П. Режимы работы устройства тонкого помола порошка $SmCo_5$ / А. П. Бабичев, Ю. М. Вернигоров, Н. Н. Фролова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2012. — № 6 (296). — С. 64–70.

2. Переработка производственных отходов и вторичных сырьевых ресурсов, содержащих редкие, благородные и цветные металлы / В. И. Букин, М. С. Игумнов, Вал. Вл. Сафонов, Вл. Вал. Сафонов. — Москва : Деловая столица, 2002. — 224 с.

3. Комаров, О. С. Переработка и использование отходов, содержащих цветные металлы / О. С. Комаров, Д. О. Комаров, Н. И. Урбанович. — Минск : БНТУ, 2018. — 114 с.

4. Рева, В. П. Механохимическая технология переработки отходов металлообработки быстрорежущей стали / В. П. Рева, Д. В. Моисеенко // Вестник машиностроения. — 2013. — № 2. — С. 51–56.

5. Переработка промышленных отходов металлопроизводства / В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров, В. Р. Бурнашев [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2013. — № 1. — С. 40–44.

6. Каяк, Г. Л. Разработка технологии утилизации шлифовального шлама / Г. Л. Каяк, В. С. Фоменко, В. В. Андреев // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2017. — № 1. (30). — С. 60–67. https://doi.org/10.5281/zenodo.399007

7. Дьяконов, О. М. Шламы металлообрабатывающего производства / О. М. Дьяконов // Литье и металлургия. — 2010. — № 1–2. — С. 154–159.

8. Повстяной, А. Ю. Использование отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения / А. Ю. Повстяной, В. Д. Рудь // Устойчивое развитие. — 2014. — № 19. — С. 159–164.

9. Lebedev, V. A. Method of Calculating the Machines Drive with Screw Working Bodies Mounted from Tetrahedral Hollows / V. A. Lebedev, G. V. Serga, M. M. Chaava //In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. — 2021. — P. 557–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_64

10. The Study of Fine-Cleaning Treatment for Removal of Burrs in Screw Rotors / V. A. Lebedev, G. V. Serga, M. M. Chaava [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1029. — Art. 012001. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012001

11. Reliability of Centrifugal–Rotational Finishing by Steel Shot / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, D. V. Kazakov, A. G. Isaev // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37. — P. 326–329. https://doi.org/10.3103/S1068798X17040219

12. Creation of Regular Microreliefs by Multicontact Shock Vibratory Tool / D. P. Motrenko, A. P. Babichev, U. A. Babichev, G. A. Prokopez // In: Proceeding of 2nd Asia - Pacific Forum on Precision Surface Finishing and Deburring Technology, July, 22–24, 2002. — Seoul, Korea; 2002. — P. 246–249.

13. Vernigorov, Y. M. Simulation of Destruction of Ferromagnetic Materials Particles in Magneto-Vibrational Layer / Y. M. Vernigorov, K. K. Leletko, N. N. Frolova // World Science: Proceedings of Articles the International Scientific Conference. Czech Republic, Karlovy Vary – Russia, Moscow, June 29–30, 2017. — 2017. — P. 59–70.

14. Improving the Efficiency of Metal Production Waste Processing in Electromagnetic Field / V. A. Lebedev, Y. M. Vernigorov, A. A. Shirin [et al.] // Materials Science Forum. — 2021. — Vol. 1037. — P. 759–766. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.759

15. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле / А. А. Кочубей, В. А. Лебедев, Ю. М. Вернигоров, И. В. Давыдова. — Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. — 135 с.

16. Quality Improvement of Powder Products by Means of Magneto-Vibrational Destruction of Aggregates / V. Lebedev, Y. Vernigorov, G. Prokopets, L. Chunakhova // AIP Conference Proceedings. — 2019. — Vol. 2188. — P. 020007. https://doi.org/10.1063/1.5138381

17. Lebedev, V. A. The Use of the Rotating Electromagnetic Field for Hardening Treatment of Details / V. A. Lebedev, A. A. Kochubey, A. V. Kiricheck // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 177. — P. 012126. https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012126

Поступила в редакцию 10.10.2022.
Поступила после рецензирования 20.21.2022.
Принята к публикации 20.21.2022.

Об авторах:

Лебедев Валерий Александрович, профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, va.lebidev@yandex.ru

Ширин Андрей Александрович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, andrey.shirin.94@yandex.ru

Коваль Николай Сергеевич, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ResearcherID, ORCID, koval-nc@mail.ru

Вернигоров Юрий Михайлович, профессор кафедры «Физика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, jvernigorov@donstu.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Лебедев, Ю. М. Вернигоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. А. А. Ширин, Н. С. Коваль — проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





Check for updates

УДК 621.865.8(075)
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-346-352

Научная статья



Расчёт угловых координат для системы управления двухзвенным манипулятором промышленного робота

С. П. Глушко
Кубанский государственный технологический университет, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2
sputnik_s7@mail.ru

Аннотация
Введение. Одной из задач двухзвенных манипуляторов промышленных роботов, выполняющих перемещение рабочего органа по сложным траекториям (например, роботов-сварщиков), является необходимость тщательного программирования их движения. Для этих целей используются методы ручного программирования или методы обучения. Эти методы достаточно трудоёмки и требуют высокой квалификации обслуживающего персонала. Возможным вариантом решения проблемы программирования перемещений манипулятора является моделирование движения с расчётом угловых координат. Это может способствовать упрощению геометрической адаптации манипулятора в процессе отладки управляющей программы. Поэтому целью работы явился расчет координат для программирования системы управления двухзвенным манипулятором, действующим в угловой системе координат и перемещающим рабочий орган по сложной траектории (например, при сварке автомобильных кузовов).
Материалы и методы. Рассмотрен двухзвенный манипулятор робота, действующий в угловой системе координат и предназначенный для циклически повторяющихся действий. Манипулятор состоит из двух вращающихся звеньев: «плеча» и «локтя», которые закреплены на основании. Основание может вращаться, что обеспечивает третью степень свободы. Такая конфигурация увеличивает рабочую область манипулятора и минимизирует площадь для его размещения на производстве. Перемещение рабочего органа манипулятора может выполняться, если кинематика обеспечивает его позиционирование по трём декартовым и трём угловым координатам. Для программного управления роботами, в том числе роботами-сварщиками, действующими в угловой системе координат и выполняющими движение рабочего органа по сложной траектории, требуется расчёт угловых координат перемещения рабочего органа двухзвенного шарнирного манипулятора. Система управления роботом должна определять положение инструмента в угловой системе координат, преобразуя его для удобства пользователя в координаты x, y и z декартовой системы координат.
Результаты исследования. Получены соотношения угловых и декартовых координат, которые можно использовать для расчёта при программировании системы управления двухзвенным манипулятором промышленного робота и организации обмена информацией между пользователем и системой управления, а также для проверки точности и отладки перемещения рабочего органа промышленного робота с использованием обратной связи.
Обсуждение и заключения. Представленные результаты работы могут быть использованы для программного управления роботом-сварщиком, действующим в угловой системе координат и выполняющим сложную траекторию перемещения рабочего органа двухзвенного шарнирного манипулятора (захвата). Манипулятор, действующий в угловой системе координат, можно использовать для контактной точечной сварки при перемещении рабочего органа по сложной траектории с применением позиционной или позиционно-контурной системы управления. Эти системы с помощью технологических команд управляют перемещением рабочего органа по заданной траектории.

Ключевые слова: промышленный робот, робот-сварщик, манипулятор, конструктивное звено, привод, перемещение, траектория, программное, управление.

Благодарности. Автор выражает благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Для цитирования. Глушко, С. П. Расчёт угловых координат для системы управления многозвенным манипулятором промышленного робота / С. П. Глушко // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 346–352. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-346-352

Original article

Calculation of Angular Coordinates for the Control System of a Two-Link Industrial Robot Manipulator

Sergey P. Glushko 
Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya St., Krasnodar, Russian Federation
sputnik_s7@mail.ru

Abstract
Introduction. One of the tasks of two-link manipulators of industrial robots that move the end-effector along complex trajectories (e.g., robot welder) is associated with the need for careful programming of their movement. For these purposes, manual programming methods or training methods are used. These methods are quite labor-intensive, and they require highly qualified service personnel. A possible solution to the problem of programming the manipulator movements is the simulation of motion with the calculation of angular coordinates. This can help simplify the geometric adaptation of the manipulator in the process of debugging the control program. Therefore, this work aimed at calculating coordinates for programming the control system of a two-link manipulator operating in an angular coordinate system and moving the end-effector along a complex trajectory (e.g., when welding car bodies).
Materials and Methods. A two-link robot manipulator designed for cyclically repeating actions in an angular coordinate system was considered. The manipulator consisted of two rotating links: “arm” and “elbow”, which were fixed on the base. The base could rotate, which provided a third degree of freedom. This configuration increased the working area of the manipulator and minimized the area for its placement in production. The movement of the manipulator end-effector could be performed if the kinematics provided its positioning along three Cartesian and three angular coordinates. For software control of robots, including welding robots operating in an angular coordinate system and performing the movement of the end-effector along a complex trajectory, it was required to calculate the angular coordinates of the movement of the end-effector of a two-link articulated manipulator. The robot control system should determine the position of the tool in the angular coordinate system, converting it for user friendliness into x, y and z coordinates of the Cartesian coordinate system.
Results. The relations of angular and Cartesian coordinates have been obtained. They can be used for calculating when programming the control system of a two-link manipulator of an industrial robot and organizing the exchange of information between the user and the control system, as well as for checking the accuracy and debugging the movement of the end-effector of an industrial robot through feedback.
Discussion and Conclusion. The presented results can be used for software control of a welding robot operating in an angular coordinate system and performing a complex trajectory of the end-effector of a two-link articulated manipulator (gripper). A manipulator operating in an angular coordinate system can be used for contact spot welding when moving the end-effector along a complex trajectory using a positioning or contouring control system. These systems control the movement of the end-effector along a given trajectory with the help of technological commands.

Keywords: industrial robot, welding robot, manipulator, structural link, drive, movement, trajectory, program control.

Acknowledgements. The author would like to thank the editorial board of the journal and the reviewer for their critical analysis and assistance in correcting the article.

For citation. S. P. Glushko. Calculation of Angular Coordinates for the Control System of a Two-Link Industrial Robot Manipulator. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 346–352. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-346-352

Введение. Промышленные роботы используются для автоматизированного управления пространственной ориентацией орудий и объектов труда в различных технологических процессах[1] [1–7]. Промышленный робот, как правило, включает манипулятор, имеющий несколько степеней подвижности, и устройство числового

[1] Козырев Ю. Г. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: учебное пособие. М., 2015. 560 с.

программного управления приводами. Манипулятор используется для перемещения захвата или инструмента по заданной траектории в заданные точки технологического пространства[2] [1–3].

При разработке программ управления перемещениями захвата или инструмента промышленного робота по сложным траекториям (например, для роботов-сварщиков) используются сложные по организации и техническому оснащению методы обучения.

Для упрощения программирования системы управления двухзвенным манипулятором промышленного робота, перемещающего рабочий орган по сложной траектории (например, при сварке автомобильных кузовов), можно использовать моделирование его перемещений с расчётом угловых координат. Это упростит геометрическую адаптацию манипулятора и процесс разработки и отладки его управляющих программ.

Цель работы — расчёт угловых координат для программирования работы системы управления двухзвенным манипулятором, действующим в угловой системе координат и перемещающим рабочий орган по сложной траектории.

Материалы и методы. На практике используются четыре основных типа манипуляторов, которые действуют в цилиндрической, сферической, прямоугольной или угловой системах координат.

На рис. 1 показана рабочая область манипулятора робота, действующего в угловой системе координат. Манипулятор состоит из двух вращающихся звеньев — «плеча» и «локтя», которые закреплены на основании. Основание может вращаться, что обеспечивает третью степень свободы. Такая конфигурация увеличивает рабочую область манипулятора и минимизирует площадь для его размещения на производстве.

Манипулятор, действующий в угловой системе координат, можно использовать для контактной точечной сварки при перемещении горелки по сложной траектории. Для выполнения контактной точечной сварки чаще всего используются роботы с позиционной или позиционно-контурной системой управления. Эти системы с помощью технологических команд управляют перемещением горелки по заданной траектории при заданной ее ориентации с постоянной скоростью.

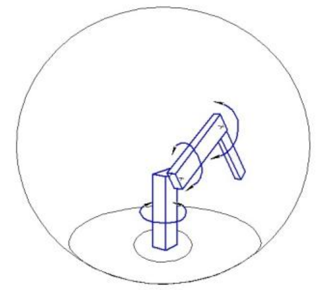


Рис. 1. Рабочая область манипулятора, действующего в угловой системе координат (рисунок автора)

При этом работа подвижных узлов манипулятора в зоне сварки может быть усложнена влиянием выделяемого тепла. Частично эта проблема решается применением водяного охлаждения горелок с автономными устройствами охлаждения. Для полного устранения этой проблемы потребуется дополнительно решить тепловую задачу с моделированием теплового процесса для определения и компенсации температурных расширений, вызванных нагревом электрическим разрядом или электрической дугой [8].

Результаты исследования. Для разработки программы управления роботом, который действует в угловой системе координат (рис. 1), необходимо выполнить расчет угловых координат перемещения рабочего органа манипулятора (захвата) [1–4, 6, 7]. На рис. 2 приведена его схема, состоящая из двух стержней 1 и 2, которые соединены сферическим шарниром 3 и плоским шарниром 4. Вся конструкция устанавливается на основании 5. Стержни манипулятора имеют длину l_1 и l_2. Шарнир 3 может вращаться в горизонтальной плоскости (угол α) и в вертикальной плоскости (угол β). Шарнир 4 вращается в вертикальной плоскости (угол γ).

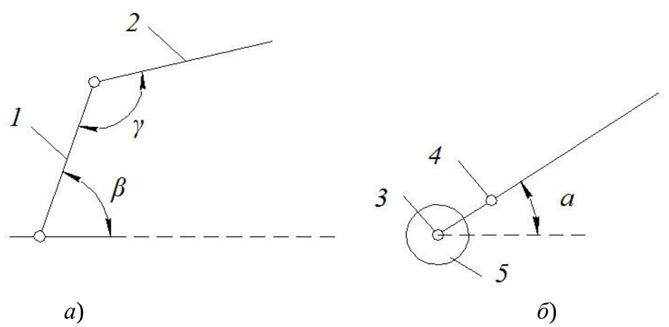


Рис. 2. Конструкция двухзвенного шарнирного манипулятора: *а* — главный вид; *б* — вид сверху (рисунок автора)

[2] То же.

На рис. 3 показана схема двухзвенного шарнирного манипулятора в виде полусферы с радиусом $R = l_1 + l_2$ и с вырезанной полусферой с радиусом r, который определяется эмпирически при отладке работы манипулятора.

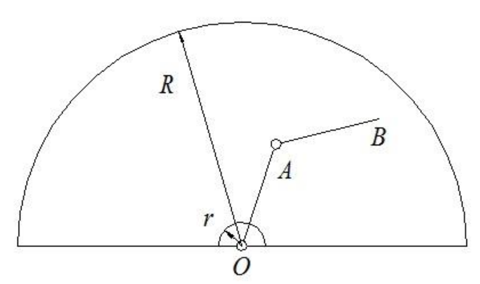


Рис. 3. Схема двухзвенного шарнирного манипулятора (рисунок автора)

Система управления манипулятором должна задавать положение инструмента в угловой системе координат и для удобства пользователя преобразовывать его в параметры декартовой системы координат.

Принимаем основание конструкции (точку O) за начало декартовой системы координат и располагаем её оси как показано на рис. 4.

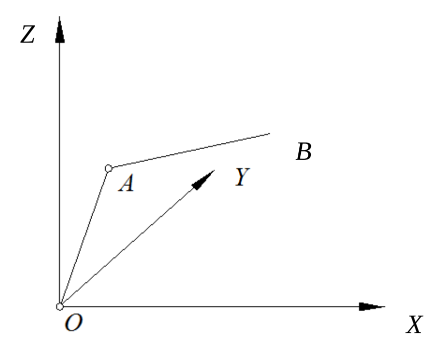


Рис. 4. Прямоугольная система координат с центром в точке O (рисунок автора)

Угол α проекции отрезка OB на плоскость XOY показан на рис. 5.

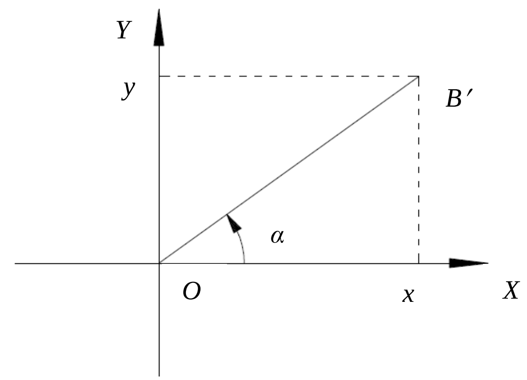


Рис. 5. Определение угла проекции отрезка OB на плоскость XOY (рисунок автора)

Угол α определяем по формуле:

$$\alpha = \pm arccos\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}},$$

где x и y — координаты точки B.

Знак «+» следует ставить, если y будет больше или равно нулю, а знак «–», когда y будет меньше нуля.

Углы на плоскости $ZOB^{\prime}$ β_1, β_2 и γ между осями координат и рычагами l_1 и l_2 показаны на рис. 6.

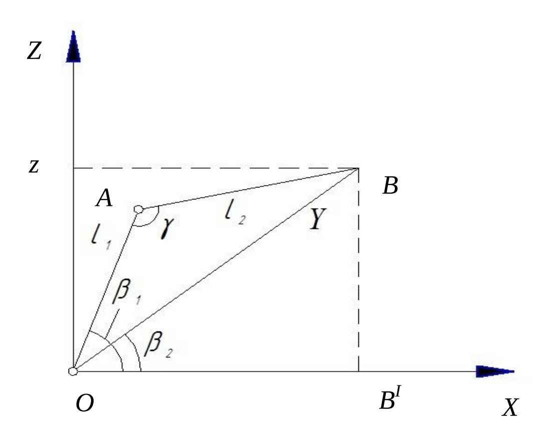


Рис. 6. Определение углов β_1, β_2 и γ (рисунок автора)

Формулы для определения углов β_1, β_2 и γ найдём, пользуясь теоремой косинусов:

$$\beta_1 = arccos\left[\frac{l_1^2 + z^2 + x^2 + y^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot \sqrt{z^2 + x^2 + y^2}}\right];$$

$$\beta_2 = arcsin\left[\frac{z}{\sqrt{z^2 + x^2 + y^2}}\right];$$

$$\gamma = arccos\left[\frac{l_1^2 + l_2^2 - z^2 - x^2 - y^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2}\right],$$

где x, y и z — координаты точки B.

Полученные соотношения можно использовать для расчёта угловых координат при разработке программ управления двухзвенным манипулятором промышленного робота, решения задач позиционного или контурно-позиционного управления с применением датчиков обратной связи для непрерывного контроля и корректировки промежуточных точек траектории перемещения манипулятора[3] и управления двигателями приводов [5, 6].

Так как динамические системы роботов, в том числе двухзвенных манипуляторов, действующих в угловой системе координат, характеризуются нелинейностями и подвержены возмущениям, то с целью устранения ошибок при воспроизведении траектории перемещения рабочего органа манипулятора предлагаемый расчёт угловых координат может быть дополнен решениями с использованием следующих методов:

– нейросетевого моделирования [9];

– имитационного исследования системы роботизированной руки для обнаружения и оценки неисправностей [10];

– эквивалентного принципа переменной структуры скользящего режима для точного восстановления произвольных нелинейных неисправностей [11];

– генетического алгоритма для решения задачи планирования траектории [12];

– генерации совместных траекторий для роботизированных манипуляторов с возможностью предотвращения столкновений [13].

Для управления двухзвенным шарнирным манипулятором со сложными траекториями его перемещения перспективно применение адаптивного управления с датчиками обратной связи, сигналы с которых обрабатываются и, по результатам обработки, принимаются решения о дальнейших действиях.

Структура аппаратной части предлагаемой системы управления (рис. 7) включает: приводы звеньев манипулятора, датчики углового положения звеньев манипулятора, датчики температуры узла крепления горелки, программируемый логический контроллер, осуществляющий функции управления манипулятором.

В промышленных роботах используются электрические, гидравлические и пневматические приводы с поступательным и вращательным движением. Наибольшее распространение в робототехнике получил электрический привод, который отличают широкий диапазон мощностей двигателей, удобство в регулировании скорости и удобство в автоматизации процессов управления.

[3] Глушко С. П., Частиков А. П., Корниенко В. Г., Тотухов К. Е. Программная система тестирования и отладки управляющих программ для робототехнического комплекса: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611987, поступ. 11.01.11 опубл. 04.03.11.

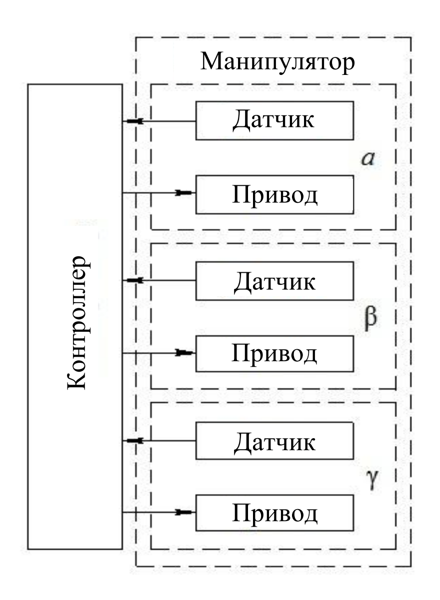


Рис. 7. Структура аппаратной части системы управления многозвенным шарнирным манипулятором (рисунок автора)

Для контроля угловых перемещений в многозвенных шарнирных механизмах манипуляторов с адаптивными системами управления, выполняющими сложные траектории, рекомендуется использовать датчики углового положения — энкодеры. С их помощью можно измерять параметры перемещения инструмента или обрабатываемого объекта, углы их поворота, направление перемещения, скорость вращения вала электродвигателя или редуктора, угловое положение по отношению к нулевой метке, направление вращения.

В адаптивных системах управления можно использовать инкрементальные (инкрементные) и абсолютные энкодеры. Инкрементальные энкодеры отличаются простотой, надежностью и относительно низкой стоимостью. Абсолютные энкодеры сложнее и дороже, но они позволяют определять углы поворота осей звеньев в любой момент времени сразу после включения питания, причём, даже в неподвижном состоянии звеньев. Абсолютные энкодеры также позволяют определять углы поворота осей звеньев при отключении и последующем восстановлении питания и не требуют возврата устройства в начальное положение. При этом на сигналы абсолютных энкодеров не оказывают влияния помехи и вибрации. В последних разработках адаптивных систем управления появились инерциальные датчики [14], имеющие ряд усовершенствований для компенсации ошибок системы управления перемещениями манипулятора.

Обсуждение и заключения. Проведен расчёт угловых координат для программирования работы системы управления двухзвенным манипулятором, действующим в угловой системе координат и перемещающим рабочий орган по сложной траектории. Полученные в работе соотношения угловых и декартовых координат можно использовать для расчёта и контроля угловых перемещений и программирования систем управления двухзвенными манипуляторами промышленных роботов, перемещающих рабочие органы по сложным траекториям.

Расчёт угловых координат для управления двухзвенным манипулятором промышленного робота, представленный в данной работе в виде решения геометрической задачи позиционирования, можно также использовать при моделировании аналогичного манипуляционного устройства или при построении системы управления таким манипулятором и организации обмена информацией между пользователем и системой управления, а также для проверки точности и отладки перемещения рабочего органа промышленного робота с использованием обратной связи.

Список литературы

1. Горитов, А. Н. Программирование промышленных роботов без остановки производственного цикла / А. Н. Горитов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2009. — № 1(19). — Ч. 1. — С. 61–64.

2. Горитов, А. Н. Синтез управляемых механических устройств с применением экспертной системы / А. Н. Горитов, И. В. Колотаев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2009. — № 1(19). — Ч. 1. — С. 72–76.

3. Горитов, А. Н. Сглаживание траектории перемещения рабочего инструмента робота манипулятора / А. Н. Горитов, С. М. Алферов // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309, № 8. — С. 176—179.

4. Горитов, А. Н. Моделирование адаптивных мехатронных систем / А. Н. Горитов, А. М. Кориков. — Томск : В-Спектр, 2007. — 350 с.

5. Босинзон, М. А. Автоматизированные мехатронные модули линейных и вращательных перемещении металлообрабатывающих станков / М. А. Босинсон // Приводная техника. — 2002. — № 1. — С. 10–19.

6. Букреев, В. Г. Алгоритм планирования траектории движения следящего многокоординатного электропривода / В. Г. Букреев, Н. В. Гусев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2003. — № 3. — С. 16–20.

7. Гусев, Н. В. Алгоритмическое обеспечение систем управления следящими электроприводами / Н. В. Гусев // Научно-технический и учебно-образовательный журнал: Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2006. — №3. — С. 57–60.

8. Глушко, С. П. Моделирование теплового процесса центробежной биметаллизации внутренней поверхности втулок / С. П. Глушко, Д. Л. Поправка, Н. С. Абрамов // Сварочное производство. — 2009. — №6. — С. 30–35.

9. Uglev, V. A. Automated Education: Tendency for Scientific Approaches Convergence / V. A. Uglev, D. I. Suchinin // In: Proc. 2nd International Conference on Applied Social Science Research (ICASSR2 014). — 2014. — P. 20–23. http://dx.doi.org/10.2991/icassr-14.2014.6

10. Xing-Gang Yan. Nonlinear Robust Fault Reconstruction and Estimation Using Sliding Mode Observers / Xing-Gang Yan, Ch. Edwards // Automatica. — 2007. — Vol. 43. — P. 1605–1614. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.02.008

11. Jing He. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems / Jing He, Changfan Zhang // Mathematical Problems in Engineering. — 2012. — Vol. 2012. — Art. 451863. https://doi.org/10.1155/2012/451843

12. A Direct Approach to Solving Trajectory Planning Problems Using Genetic Algorithms with Dynamics in Complex Environments / F. J. Abu-Dakka, F. J. Valero, J. L. Suñer, V. A. Mata // Robotica. — 2015. — Vol. 33. — P. 669–683. http://dx.doi.org/10.1017/S0263574714000393

13. On-Line Path Planning with Collision Avoidance for Coordinate- Controlled Robotic Manipulators / T. Kivelä, J. Mattila, J. Puura, S. Launis // In: Proc. ASME/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control. — 2017. — P. 1–10. http://dx.doi.org/10.1115/FPMC2017-4297

14. Titterton, D. H. Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd ed. / D. H. Titterton, J. L. Weston // MPG Books Ltd.: Bodmin, Cornwall, UK; 2004. — 558 p.

Поступила в редакцию 19.09.2022.
Поступила после рецензирования 20.10.2022.
Принята к публикации 20.10.2022.

Об авторе:

Глушко Сергей Петрович, доцент кафедры «Инженерия систем управления, материалов и технологий в машиностроении» Кубанского государственного технологического университета (РФ, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2), кандидат технических наук, доцент, ORCID, sputnik_s7@mail.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 62-529.4
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-353-364

Научная статья



Исследование актуальности робототехнических технологий

М. В. Ядровская, **И. В. Гурин** ✉
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ midwai61rus@gmail.com

Аннотация
Введение. Робототехнические технологии служат важным показателем технологического и экономического состояния государства, они влияют также и на жизнь отдельных людей. Развитие их — перспективная и актуальная задача, затрагивающая многие аспекты жизни современного общества. В настоящее время робототехника переживает очередной этап развития, который имеет свои особенности, новые направления. Целью данной работы является анализ положения и путей развития данной отрасли в мире и в нашей стране, а также отношение людей к использованию робототехнических систем и готовности их совершенствовать. Эти вопросы являются малоизученными.

Материалы и методы. В представленном исследовании названы исторические аспекты формирования уникальных робототехнических технологий, определено соотношение количества производителей и потребителей робототехнической продукции в мире, указаны отрасли ее применения. Центральное место в работе отведено итогам проведенного авторами онлайн-опроса, статистический анализ которого позволил по конкретным данным изучить факторы, влияющие на распространение робототехнических систем и робототехнических технологий и способствующие им.

Результаты исследований. Итоги опроса, с одной стороны, показывают высокую оценку перспективности робототехнических систем, данную респондентами, и подтверждают наличие у молодежи интереса к данным технологиям. С другой стороны, они позволяют отметить высокий уровень знаний в области робототехнических технологий у студентов инженерных специальностей и наличие более чем элементарных знаний этих технологий у представителей других специальностей. На взгляд авторов, имеются все предпосылки для дальнейшего успешного развития этих технологий.

Обсуждение и заключения. Анализ использования робототехники в мире и в нашей стране, а также результаты проведенного авторами опроса позволяют сделать вывод о том, что эти технологии развиваются и будут активно развиваться и впредь, а заинтересованность в этом нынешних студентов, подтвержденная ответами на вопросы анкеты, будет способствовать более широкому внедрению роботов в жизнь будущих поколений.

Ключевые слова: робототехнические технологии, робототехника, промышленные роботы, робототехнические системы, исследование, интернет-опрос, статистический анализ.

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам и обучающимся кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета за помощь при сборе данных.

Для цитирования. Ядровская, М. В. Исследование актуальности робототехнических технологий / М. В. Ядровская, И. В. Гурин // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 353–364. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-353-364

Original article

Study on the Relevance of Robotics Technology

Marina V. Yadrovskaya, Ilya V. Gurin ✉
Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ midwai61rus@gmail.com

Abstract
Introduction. Robotic technologies serve as an important indicator of the technological and economic state of the country, they also affect the lives of individuals. Their development is a promising and urgent task affecting many aspects of the life of modern society. Currently, robotics is going through another stage of development, which has its own characteristics, new directions. The work aims at analyzing the situation and ways of development of this industry in the world and in our country, as well as the attitude of people to the use of robotic systems and their willingness to improve them. The topic under consideration is understudied.
Materials and Methods. In the presented work, the historical aspects of the formation of unique robotic technologies are defined, the ratio of the number of manufacturers and consumers of robotic products in the world is specified, the areas of the robotic technology application are named. The central place in the research is given to the results of an online survey conducted by the authors. Its statistical analysis made it possible to study, using specific data, the factors that influence the spread of robotic systems and robotic technologies and contribute to them.
Results. The survey results, on the one hand, showed a high assessment of the prospects of robotic systems given by the respondents, and confirmed that young people have an interest in robot-making technologies. On the other hand, they allowed us to note the high level of knowledge in the field of robotic technologies among engineering students and the presence of more than elementary knowledge of these technologies among representatives of other special fields. In the opinion of the authors, there are all prerequisites for the further successful development of these technologies.
Discussion and Conclusions. The analysis of the use of robotics in the world and in our country, as well as the results of the survey conducted by the authors, enable to conclude that these technologies are developing and will continue to develop actively, and the interest of current students in this, confirmed by the answers to the questionnaire, will contribute to the wider introduction of robots into the lives of future generations.

Keywords: robotic technology, robotics, industrial robots, robotic systems, research, Internet survey, statistical analysis.

Acknowledgements. The authors would like to thank the staff and students of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University, for their assistance in data collection. Appreciation is expressed to anonymous reviewers.

For citation. M. V. Yadrovskaya, I. V. Gurin. Study on the Relevance of Robotics Technology. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 353–364. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-353-364

Введение. Роботы — автоматические устройства, способные выполнять монотонную и сложную работу. Они появлялись в жизни человека, изменяясь со временем. За последнее десятилетие они преобразовались в механизмы, способные эффективно взаимодействовать с людьми, понимать их жесты и эмоции. Это стало возможным благодаря развитию робототехники. Стремительное развитие технологий интеллектуального управления и обработки информации на фоне научных открытий в области энергетики, машиностроения, микропроцессорной техники и телекоммуникационных систем обусловливает новый этап в производстве и применении робототехнических систем (РТС) [1–3].

Робототехника является отраслью, которая широко применяет современные информационные технологии в инженерных приложениях, способствуя привлечению технических средств к получению и использованию информации для создания систем управления сложными объектами. По мнению экспертов, робототехнические системы, которые используются в машино-, автомобиле- и судостроении, авиации, космонавтике, медицине, текстильной промышленности и др.., способствуют повышению уровня автоматизации производства, что приводит к сокращению от 15 до 90 % расходов в зависимости от области применения[1].

История феномена робототехнических систем для неспециалистов связана с размышлениями писателей-фантастов, для специалистов — с разработками первых промышленных роботов-манипуляторов. На самом деле

[1]Аналитический обзор мирового рынка робототехники / ПАО «Сбербанк» // sberbank.com : [сайт]. URL: https://adindex.ru/files2/access/2019_07/273895_sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf (дата обращения: 15.10.2021).

концепция автоматизированных механизмов, которые могут самостоятельно выполнять необходимые операции, появилась раньше и прошла длительный путь развития. История создания роботов связана с развитием механики. Во многих странах еще до нашей эры были сконструированы первые автоматические устройства. Принципы их создания и функционирования были сформулированы в Древней Греции, которую можно считать родиной робототехники. На завершающем этапе эпохи Древнего мира были открыты многие виды передач и двигателей, сформулированы основные законы классической механики. С началом эпохи Возрождения автоматические механизмы получили развитие, были разработаны пружинный и маятниковый заводные механизмы, позволившие умелым мастерам создавать невероятные устройства, которые были способны автоматически выполнять некоторые действия. Сначала эти устройства носили развлекательный и эстетический характер. Технология создания подобных устройств получила широкое распространение в Европе и мире, она развивалась и расширяла сферу применения. В дальнейшем стало очень важным развитие технологии электричества. Электрический ток стал источником питания, средством получения, передачи и обработки информации. Благодаря всем накопленным достижениям в 1920–1930-е годы были разработаны механизмы, которые отвечали требованиям робототехнических систем и демонстрировали научные достижения. После окончания Второй мировой войны началось применение робототехники в промышленности, непрерывно совершенствовались функциональность и системы управления роботами, внедренными в промышленное производство [1, 4].

Традиционно в робототехнике выделяют промышленную (ПР) и сервисную робототехнику. Сегодня робототехника переживает новый виток развития. Появилась мобильная промышленная робототехника, коботехника (robotique collaborative), позволяющая человеку и роботам совместно решать сложные задачи [5]. Наиболее активно развиваются два направления. Первое связано с дистанционным управлением робототехническими системами, которое могут осуществлять человек или компьютер. Второе сопряжено с применением механических манипуляторных систем типа «рука» или «нога» для оперирования объектами [1].

Развитие робототехники сегодня основывается на кооперационных связях независимых специалистов, научных организаций и компаний [1]. Ведущее место в развитии инновационных робототехнических технологий принадлежит государству: реализация национальных стратегий развития, грантовое финансирование, размещение оборонных заказов[2]. Наибольшее количество инновационных робототехнических компаний находится в Канаде, Дании, Финляндии, Италии, Израиле, Нидерландах, Норвегии, России, Испании, Великобритании, Швеции и Швейцарии [1]. Проанализируем современное состояние производства и потребления робототехнических систем.

Основные производители ПР: Северная и Западная Европа, США, Юго-Восточная Азия. Выделяются следующие лидирующие компании-производители робототехнических устройств: японские FANUC, Yaskawa, Kawasaki, Nachi, Denso, Mitsubishi, Epson, Omron, шведско-швейцарская ABB. Появляются и новые компании. Например, робототехническая компания Universal Robotics заявила о себе в 2005 году как небольшой университетский стартап по созданию компактного робота[2].

В 2018 году 74 % глобального рынка ПР занимали Китай, Япония, Южная Корея, США и Германия. Япония находится на первом месте в мире по производству и экспорту ПР: на ее долю в 2018 году приходилось 52 % мировой торговли промышленными роботами. В 2018 году производство робототехники в США составило 40,3 тыс. ПР, что на 22 % больше, чем было в 2017 году. Германия является пятой в мире и первой в Европе страной по объему рынка ПР. За ней следуют Италия и Франция [6].

Азиатский регион считается крупнейшим производителем ПР. Отметим, что в Республике Корея с февраля 2018 года реализуется уже третья программа «Стратегия развития производства умных роботов». Ее задачи состоят в популяризации коллаборативных и сервисных роботов, повышении инновационного потенциала роботостроения, расширении робототехнического рынка, увеличении мер государственной поддержки, усилении общественной осведомленности в области робототехники[3]. В 2018 году производство ПР в Китае и Южной Корее сократилось, а в Японии выросло. В целом прирост в азиатском регионе составил 1 %.

Второй важный производитель — европейский регион, он демонстрирует постоянное повышение темпов роста ПР (с 2017 по 2018 год прирост составил 14 %).

В 2012 году Европейской комиссией был инициирован проект Robolaw, направленный на решение проблем терминологии, правовых и этических норм, связанных с роботами [5]. Результаты этой работы легли в основу резолюции Европейского парламента от 16.02.2017 № 2015/2103 (INL) «Нормы гражданского права о

[2] Аналитический обзор мирового рынка робототехники.
[3] Sang-mo K. Policy directions for S. Korea's robot industry // Business Korea : [сайт]. URL: http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=24394 (дата обращения: 20.10.2021).

робототехнике», а также инициативы создания Европейского агентства по робототехнике и Искусственному интеллекту и введении статуса «электронных личностей» для роботов[4].

Отметим, что в России также созданы правовые условия для разработки роботов в рамках «регуляторных песочниц». Робототехника входит в перечень технологий, применяемых в рамках экспериментальных правовых режимов в сфере цифровых инноваций благодаря постановлению правительства Российской Федерации от 28.10.2020 № 1750[5].

В Северной и Южной Америке в последние годы наблюдается рекордный рост производства ПР (рис. 1) [6].

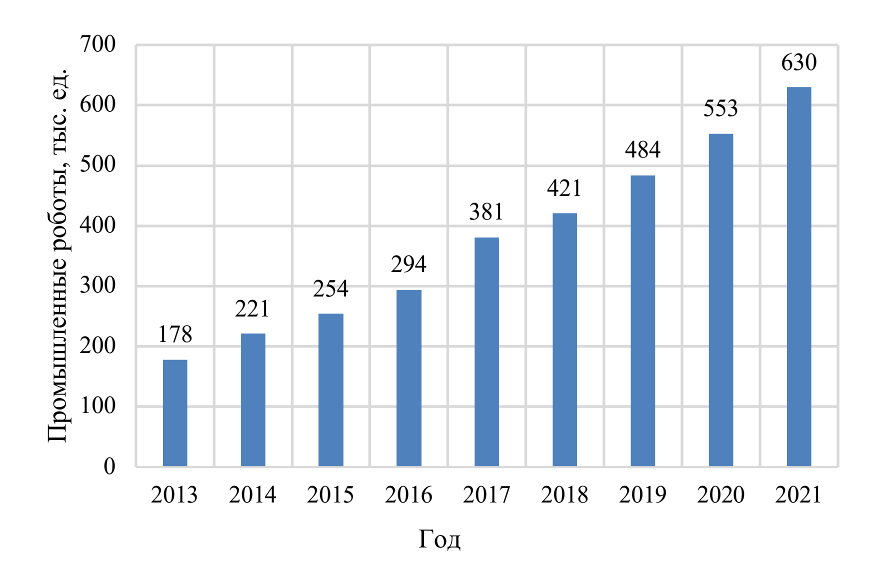


Рис. 1. Динамика роста объёма мирового рынка промышленных роботов, тыс. ед.
(рисунок авторов)

Китай — крупнейший потребитель промышленных роботов с долей в 36 % от общего числа произведенных ПР (154 тыс.) общей стоимостью 5,4 млрд долл., это больше, чем количество ПР, работающих в Европе и Америке. В Южной Корее количество вводимых в эксплуатацию ПР с 2013 года увеличивалось ежегодно на 12 %.

Главным потребителем ПР в мире с долей 30 % от общего объема поставок является автомобильная промышленность. Основными странами-потребителями таких роботов считаются Китай, Япония, Германия, США, Южная Корея [1].

К сожалению, Россия не относится к лидерам по объему применения промышленных роботов. Внедрение робототехники осуществляется невысокими темпами, поэтому в последние годы не было наблюдаемого в период с 2005 по 2010 год высокого спроса на ПР, хотя интерес к технологиям с применением промышленных роботов все же не ослабевает, увеличивается количество компаний-интеграторов, которые являются технологическими проводниками между производителями и конечными заказчиками [7]. Правительство Российской Федерации в рамках «Стратегии развития отрасли информационных технологий в РФ на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года» включило развитие робототехники в перечень приоритетных направлений технологического развития. По мнению экспертов, главная задача государства должна состоять в поддержке исследований и разработок, связанных с развитием робототехники, в формировании заказа и стимулировании спроса на создаваемую продукцию для различных отраслей, включая промышленность, военное производство, связь и энергетику [8].

В настоящее время в мире на электронную промышленность приходится около трети (32 %) поставок роботов [1]. Основными странами-потребителями ПР в электротехнической/электронной промышленности являются Китай, Южная Корея, Япония [6]. Производство пластмасс и химическая промышленность используют 5 % поставок ПР; производство продуктов питания и напитков — 3 % [6].

Важным показателем роботизации промышленности является количество ПР, приходящихся на 10 тыс. работников. В обрабатывающей промышленности он выглядит следующим образом: в Европе — 114 штук, в

[4] Civil Law Rules on Robotics : European Parliament resolution of 16 February 2017 with recommendations to the Commission // europarl.europa.eu : [сайт]. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051_EN.pdf (дата обращения: 22.10.2021).

[5] Об утверждении перечня технологий, применяемых в рамках экспериментальных правовых режимов в сфере цифровых инноваций / Правительство Российской Федерации // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: http://static.government.ru/media/files/o8LH12RcKX2aDbzOOyGYp78LPATZqQu7.pdf (дата обращения: 23.10.2021).

Северной и Южной Америке — 99; в Азии и Австралии — 91. С 2013 по 2018 год среднегодовой рост количества используемых роботов в Азии составлял 16 %, в Америке — 9 %, в Европе — 6 %. По этому показателю в течение многих лет первое место занимает Сингапур (831 ПР на 10 тыс. работников в 2018 году), второе место — Южная Корея (774 ПР), третье — Германия (338 ПР) [6]. Плотность роботизации в России в 20 раз ниже, чем в мире. В отличие от Запада, в нашей стране она не проходила безостановочно ввиду ряда социально-экономических потрясений[6].

Коллаборативных роботов (коботов) относят к ПР, используемым для выполнения поставленных задач совместно с работниками. Они могут дополнять и улучшать деятельность человека, не создавая ему угроз. Их отличают безопасность, сравнительно низкая цена, небольшой срок окупаемости, гибкость, многозадачность, они легко перенастраиваются на выполнение различных сценариев и могут быть созданы преобразованием из промышленного робота[7]. Наиболее широкое применение эти роботы находят в медицине, фармацевтике, автомобилестроении. Большое внимание коботам уделяют средства массовой информации. Рынок этих роботов невелик, в 2018 году было продано около 14 тыс. единиц, что составляет 3,24 % от 422 тыс. ПР, поставленных заказчикам [6].

В настоящее время можно выделить две группы сервисных роботов: профессиональные (для извлечения выгоды при оказании услуг) (ПСР) и персональные (для использования в повседневной жизни) [6]. Рынок персональных роботов все время увеличивается. По прогнозам, в 2022 году их может быть продано 61,1 млн единиц (на сумму 11,5 млрд долл.) [6].

Европейские и американские компании являются крупнейшими производителями ПСР. Американцы лидируют в сегменте логистических систем, европейцы — в области медицинской робототехники. Европейские и азиатские компании производят 45 % сельскохозяйственных роботов [6].

В 2018 году сумма продаж ПСР составила 9,2 млрд долл. 41 % проданных ПСР приходится на логистические системы, 39 % составляют ПСР для инспекционных и ремонтных работ [3]. В 2017 году было продано всего 6055 роботов для сельского хозяйства, 300 — для добычи полезных ископаемых, 1000 — для атомной промышленности, судо- и самолётостроения. Именно эти отрасли являются традиционно сильными в России. Эксперты рассчитывают на развитие робототехнических систем в этих отраслях[8]. В 2018 году было продано 106 тыс. систем контроля и технического обслуживания, 5,8 тыс. — доильных роботов, 5,1 тыс. — медицинских, которые являются самыми дорогими из сервисных роботов. Их средняя цена — 548 тыс. долл., включая аксессуары и услуги. Также постоянно растет спрос на вспомогательные роботы для пожилого населения в Европе и Азии [6].

Выросло производство энергетических человеческих экзоскелетов, способных поддерживать эргономичность труда и снижать нагрузку на работника, оно составило в 2018 году 7,3 тыс. штук [6].

Между промышленной и сервисной робототехникой постепенно стирается грань за счет развития промышленного использования сервисной робототехники, т. е. наблюдается «конвергенция технологий промышленной и сервисной робототехники» [1]. В ближайшее время разделение роботов на промышленные и сервисные потеряет смысл, так как один и тот же робот сможет решать задачи как в цеху, так и в сервисном окружении[9].

Важными факторами распространения роботов являются высокий спрос на робототехническую продукцию, значительный рост инвестиций в создание роботов, увеличение количества патентов на робототехнические разработки, все более широкое внедрение систем искусственного интеллекта (ИИ) [1]. Эксперты указывают на тенденцию развития ИИ-роботов, имея в виду тот факт, что каждый управляемый робот обладает элементами ИИ[10].

Повышение спроса на роботов сопровождается понижением их стоимости. Средняя цена одного промышленного робота упала с 45 500 в 2016 году до 44 000 долл. в 2017 году, выросла доля «недорогих» роботов.

В дальнейшем применение робототехнических систем будет расти, а развитие роботов будет осуществляться по следующим направлениям: совершенствование механизмов, приводов, алгоритмов, развитие самообучающихся систем управления с использованием слабого искусственного интеллекта, разработка интерфейсов «человек — компьютер», распознавание речи и др. [8–10]. Эксперты указывают на необходимость

[6] Технологические тенденции развития промышленных роботов / TAdviser // tadviser.ru : [сайт]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F:TAdviser (дата обращения: 07.10.2021).

[7] То же.

[8] Аналитический обзор мирового рынка робототехники.

[9] То же.

[10] Технологические тенденции развития промышленных роботов.

особое внимание при создании и внедрении промышленных роботов уделять вопросу кибербезопасности. При этом понимать кибербезопасность следует не только как безопасность совместной работы человека и робота, а более широко: безопасность производственного комплекса в целом, настройка политики безопасности удаленного управления роботом, коммерческая и производственная тайна, охрана интеллектуальной собственности[11].

По мнению экспертов, важнейшим рынком робототехники на предстоящее десятилетие останется обрабатывающая промышленность. Особый вклад в робототехнику внесут цифровизация производства и развитие автономных транспортных средств, способствующих мобильности. Также будут развиваться логистика и здравоохранение, в котором преимущества получат хирургические и медицинские телеприсутствующие роботы. Значительное развитие получит «умное» сельское хозяйство [6].

Материалы и методы исследования. С целью изучения отношения к робототехническим технологиям в социальных сетях была размещена анкета и проведен онлайн-опрос. Задача исследования состояла в применении статистических методов для обработки и обобщения полученных данных. Исследование не претендует на фундаментальность, но позволяет сформировать актуальное мнение об отношении к робототехническим системам в обществе и о современном состоянии робототехники.

Охарактеризуем группу респондентов. Количество опрошенных — 116 человек. В их состав вошли студенты бакалавриата и магистратуры технического вуза, инициировавшие опрос, знакомые и близкие им люди, преподаватели вуза. Большая часть респондентов — это люди, не связанные с робототехникой. Средний возраст участников — 24 года. Максимальный возраст — 67 лет, минимальный — 12 лет (рис. 2). Большинство ответивших на вопросы — представители мужского пола (70 %) (рис. 3). 58,7 % респондентов имеют или получают высшее образование (рис. 4). 73,3 % имеют специальность, связанную с инженерным делом, информационными технологиями и техническими науками (рис. 5).

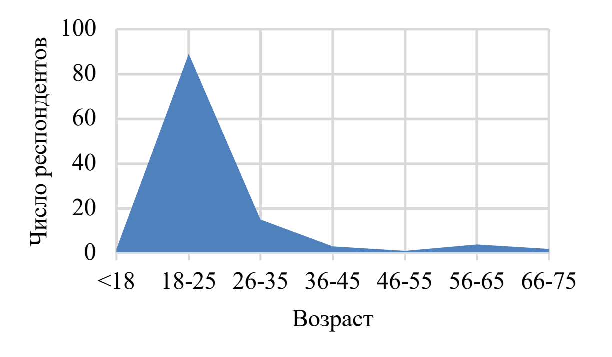


Рис. 2. Количество респондентов по возрасту (рисунок авторов)

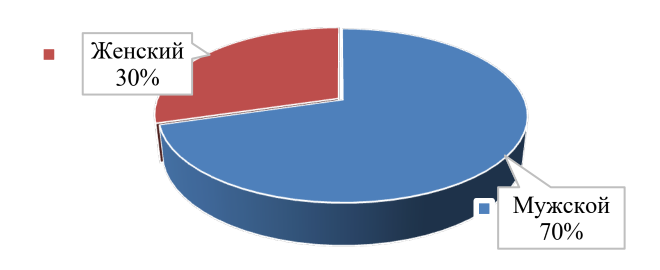


Рис. 3. Гендерная принадлежность респондентов, % (рисунок авторов)

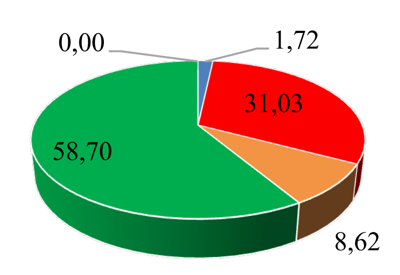


Рис. 4. Количество респондентов по образованию, % (рисунок авторов):

- основное общее образование (5–9 классы);
- среднее общее образование (10–11 классы);
- среднее профессиональное образование;
- высшее образование

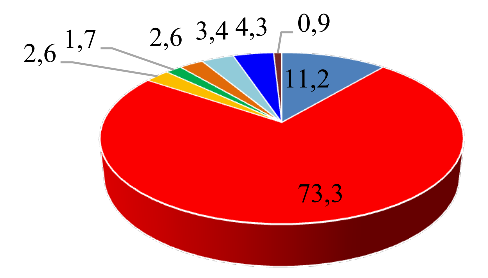


Рис. 5. Количество респондентов по специальностям, % (рисунок авторов):

- математические и естественные науки;
- инженерное дело, информационные технологии и технические науки;
- здравоохранение и медицина;
- сельское хозяйство и с.-х науки;
- науки об обществе;
- образование и педагогические науки;
- гуманитарные науки;
- искусство и культура

[11] Технологические тенденции развития промышленных роботов.

Респонденты так обозначили свои увлечения: программирование (в том числе микроконтроллеров), техника, электроника, робототехника, компьютерные игры, декоративная сварка, сборка радиоприборов, выжигание по дереву, писательство, занятие английским языком, информационные технологии, спорт, чтение, искусство, рисование, занятия музыкой, выращивание цветов. Как можно заметить, диапазон увлечений очень широк. При этом основными увлечениями респондентов являются программирование, техника, электроника, робототехника, компьютерные игры и информационные технологии, что может быть обосновано специальностью большинства респондентов (рис. 6). Этот факт важно подчеркнуть для объективности полученных результатов.

96 % респондентов — это россияне. Остальные четыре процента опрошенных проживают не в России (рис. 7–9).

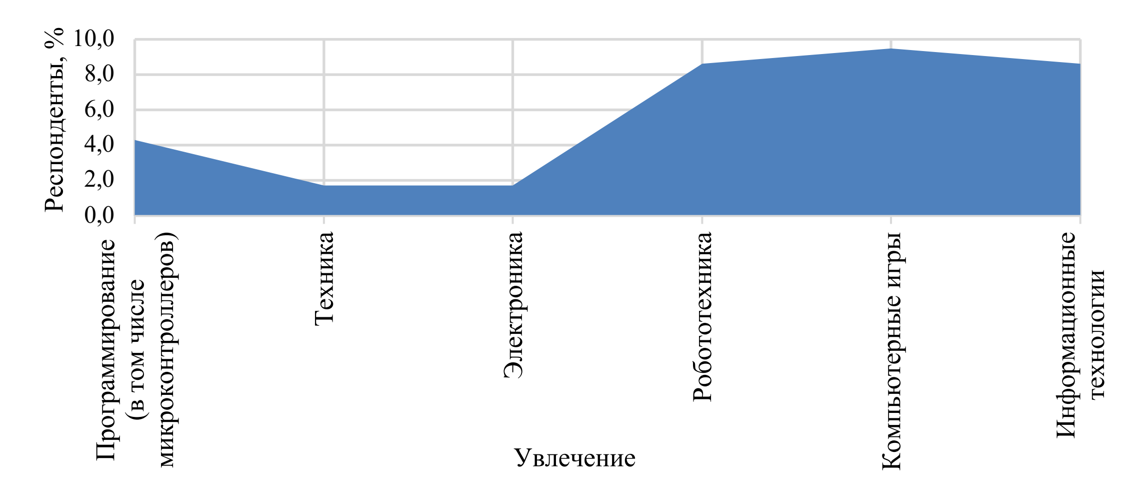


Рис. 6. Количество респондентов по увлечениям, % (рисунок авторов)

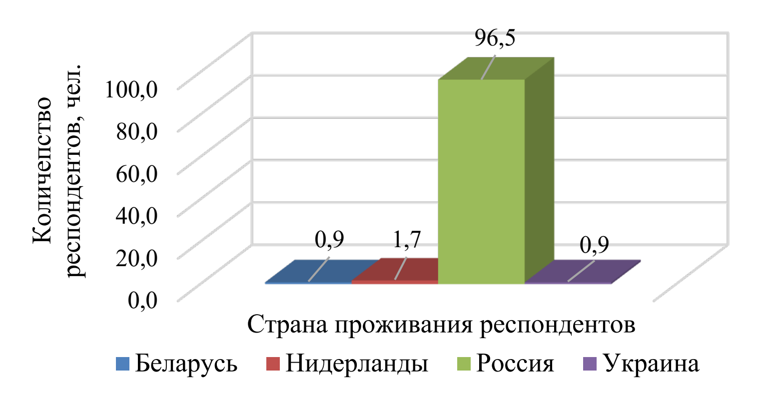


Рис. 7. Количество респондентов по месту проживания (страна), % (рисунок авторов)



Рис. 8. Количество респондентов по месту проживания (населенный пункт), чел. (рисунок авторов)

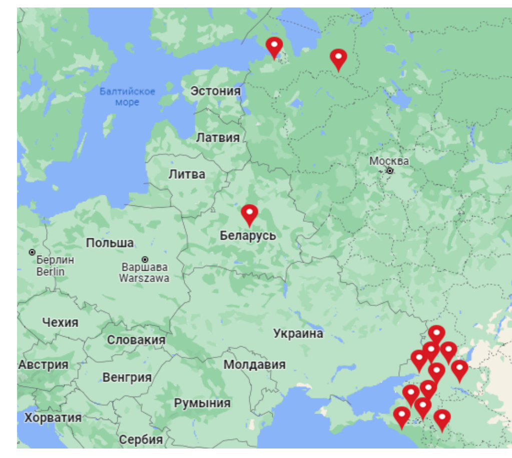


Рис. 9. Карта с отметкой места жительства респондентов [6]

Результаты исследования. Рассмотрим основные результаты опроса. 65 % ответивших на вопросы анкеты дали высшую оценку перспективности робототехнических систем (рис. 10). Отметим, что подтвердилась гипотеза о том, что мнение о перспективности роботов не зависит от специальности респондентов. При этом верна гипотеза о том, что мнение о перспективности роботов не влияет на определение области наиболее широкого применения робототехники сегодня.

Подтвердилась также гипотеза о том, что мнение о наиболее перспективной области применения роботов не зависит от специальности респондентов. 48 % опрошенных наиболее перспективной считают строительную отрасль, 33 % — промышленность (рис. 11).

В опросе приняли участие жители других стран. Ввиду малого количества иностранных респондентов вопрос о влиянии страны проживания на определение наиболее перспективной области применения роботов не мог повлиять на результаты опроса.

Области наиболее широкого применения роботов сегодня, по мнению опрошенных, это промышленность (так считают 65 % респондентов), строительство (19 %), быт (9 %) (рис. 12).

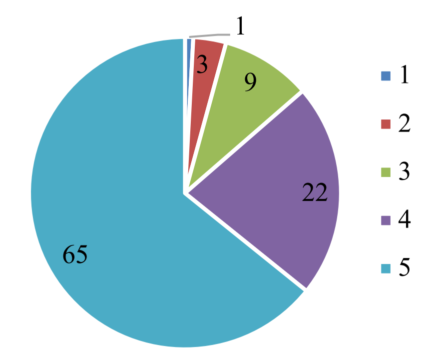


Рис. 10. Оценки опрошенных (1–5 баллов) о перспективности роботов, % (рисунок авторов)

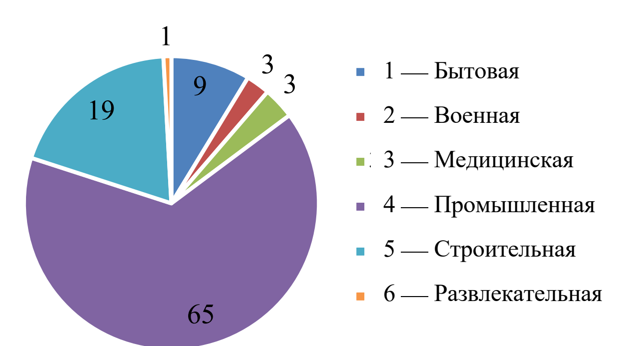


Рис. 11. Наиболее перспективные области применения роботов, по мнению респондентов, % (рисунок авторов)

Подтвердилась гипотеза о том, что желание создавать роботов и мнение о перспективности роботов зависимы. Желание создавать роботов изъявили 40 % респондентов, столько же считают возможным создавать роботов, и только 20 % опрошенных не хотят этим заниматься (рис. 13). Отметим, что желание создавать роботов зависит от гендерной принадлежности, от специальности и от возраста опрошенных. При этом желание создавать роботов респонденты намерены реализовать в рамках своей специальности.

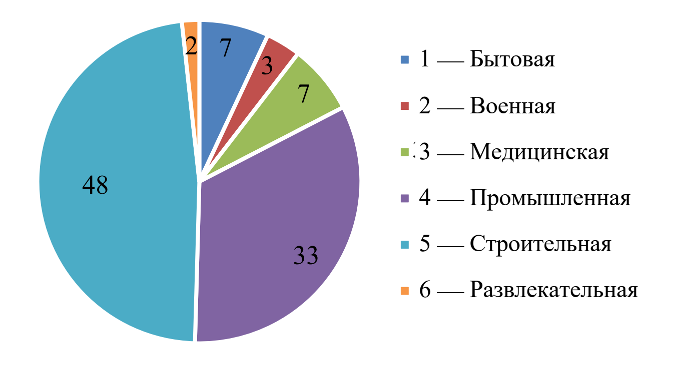
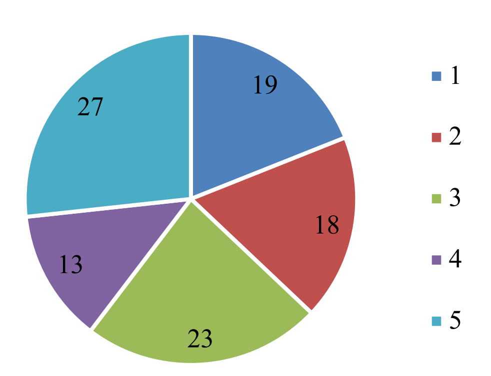


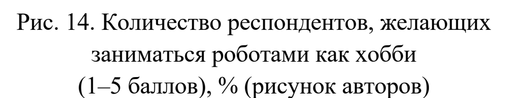
Рис. 12. Области наиболее широкого применения роботов сегодня, по мнению респондентов, % (рисунок авторов)

Количество респондентов, %
50
40
30
20
10
0
40
40
20
Желание создавать роботов
Да Возможно Нет

Рис. 13. Количество желающих создавать роботов, % (рисунок авторов)

27 % респондентов дали наивысшую оценку (в баллах) желанию заниматься роботами в качестве хобби (рис. 14). Такое же количество респондентов (28 %) дали наивысшую оценку (в баллах) желанию заниматься роботами в рамках специальности (рис. 15). Количество опрошенных, желающих заниматься роботами в рамках хобби и в рамках специальности, практически совпадают. Отметим, что желание заниматься роботами в рамках специальности зависит от специальности, от уровня знаний в области робототехники и от убеждения респондентов в перспективности роботов, но не зависит от образования.




Рис. 14. Количество респондентов, желающих заниматься роботами как хобби (1–5 баллов), % (рисунок авторов)

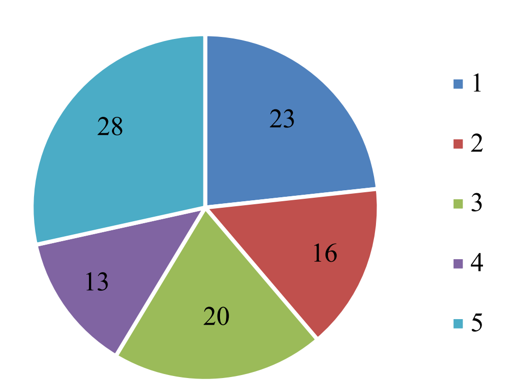


Рис. 15. Количество респондентов, желающих заниматься роботами в рамках специальности (1–5 баллов), % (рисунок авторов)

29 % опрошенных поставили минимальную оценку (1 балл из 5) своему уровню знаний в области робототехники, и 5 % — максимальную (рис. 16). 16 % респондентов поставили минимальную оценку (1 балл из 10) знаниям того, как устроены и работают роботы, и 10 % — максимальную (рис. 17).

Отметим, что количество опрошенных всех специальностей уменьшается по мере повышения отмеченного ими уровня знаний в области робототехники (начиная с 3-го уровня). При этом количество респондентов с уровнем знаний 2 для всех специальностей оказывается больше, чем с уровнем 1 (минимальный уровень). Это можно объяснить наличием определенных знаний робототехники (не только элементарных) у всех опрошенных из-за интереса к этой области. Количество респондентов инженерных специальностей также уменьшается с повышением данной ими оценки уровня своих знаний. Такой факт свидетельствует о том, что для рассматриваемой выборки не наблюдается статистически определяемой зависимости между уровнем знаний в области робототехники и специальностью респондентов.

Не обнаружена зависимость между уровнем знаний в области робототехники и возрастом респондентов, а также местом их проживания. Эти выводы могут стать поводом для последующих исследований в области качества подготовки специалистов-робототехников, что в настоящее время является несомненно актуальным вопросом, учитывая мировые тренды.

Следующий вывод, который был сделан благодаря опросу, подтвердил уже существующую гипотезу: уровень знаний в области робототехники зависит от гендерной принадлежности. Действительно, больший интерес к этой теме проявляют лица мужского пола. Об этом свидетельствует и соотношение обучающихся по робототехнической специальности в вузах девушек и ребят.

Следующий вопрос касался влияния специальности на знание того, как устроены и работают роботы. Лишь 26 % респондентов не инженерных специальностей выставили себе оценки за наличие этих знаний ниже 5-го уровня (всего 10 уровней). Среди опрошенных с инженерными специальностями оказались респонденты с высоким уровнем знания того, как устроены и работают роботы. Можно надеяться, что это не только преподаватели, участвовавшие в опросе. Также важно подчеркнуть, что опрос выявил совсем не большое количество опрошенных инженерных специальностей с невысоким уровнем знаний роботов (до 4-го уровня), это меньше, чем можно было ожидать. И, наоборот, опрошенных с высоким уровнем знания роботов больше, чем предполагалось.

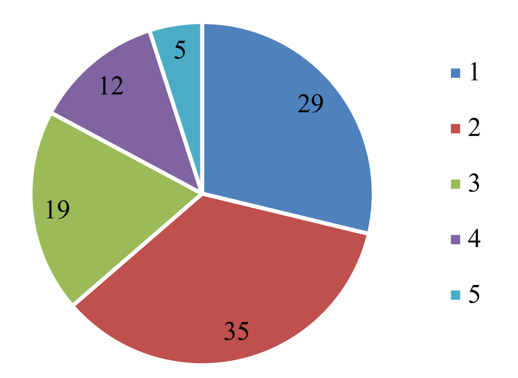


Рис. 16. Количество респондентов по уровню знаний (1–5 баллов) в области робототехники, % (рисунок авторов)

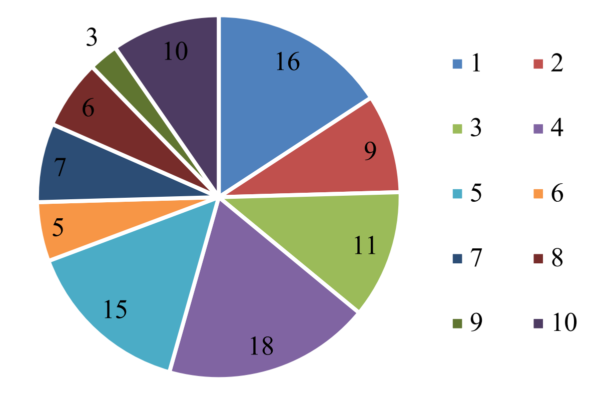


Рис. 17. Количество респондентов по оценке знаний (1–10 баллов) того, как устроены и работают роботы, % (рисунок авторов)

15 % опрошенных считают, что в связи с широким распространением робототехнических систем возможно восстание машин, 29 % сомневаются в такой возможности, и 56 % думают, что это невозможно (рис. 18). Мнение о возможности восстания машин не зависит ни от знаний устройства роботов, ни от возраста респондентов.

41 % опрошенных убеждены, что роботы могут вытеснить людей с рабочих мест, 40 % считают это возможным, и только 19 % не верят в это (рис. 19). Мнение о том, что роботы вытеснят человека с рабочих мест, не зависит от образования, специальности, страны проживания и от уровня знаний респондентов в области робототехники.

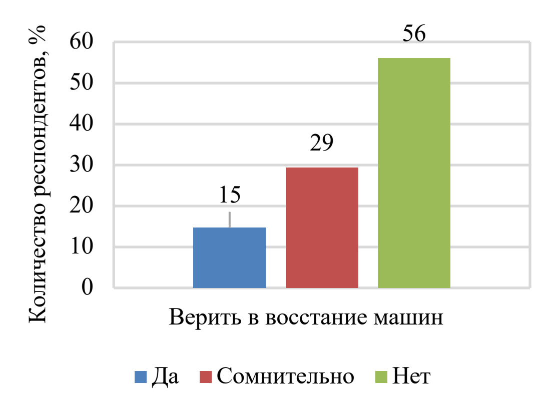


Рис. 18. Количество респондентов, считающих возможным восстание машин, % (рисунок авторов)

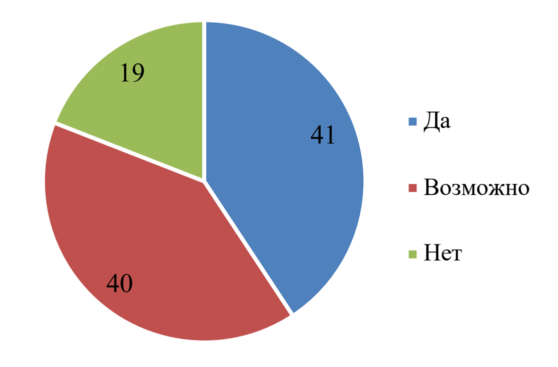


Рис. 19. Количество респондентов, считающих, что роботы могут вытеснить людей с рабочих мест, % (рисунок авторов)

7 % опрошенных поставили минимальную оценку степени опасения, которое появляется у них от роботов, похожих на человека, 41 % — максимальную оценку (рис. 20). Многие настороженно относятся к роботам, похожим на человека. Гендерная характеристика респондентов влияет на опасения, связанные с роботами, похожими на человека. Наличие опасений, связанных с роботами, похожими на человека, не зависит от специальности респондента. Не подтвердилась гипотеза о том, что, если у респондентов вызывают опасения роботы, похожие на человека, то они верят в возможность восстания машин.

Большинство опрошенных не имеют роботов, кроме робота-пылесоса (имеют 18 % респондентов) и некоторой бытовой техники, которую отчасти можно отнести к робототехническим системам (рис. 21).

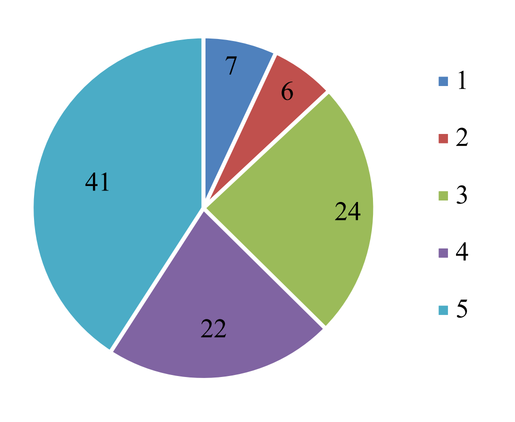


Рис. 20. Количество респондентов, опасающихся роботов, похожих на человека (1–5 баллов), % (рисунок авторов)

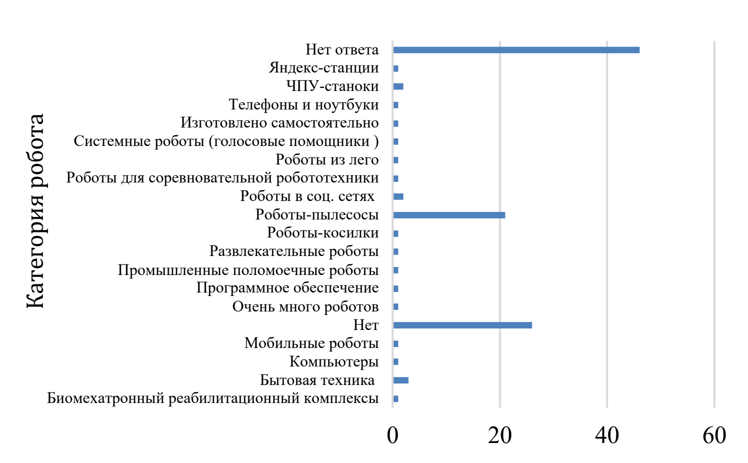


Рис. 21. Количество респондентов, имеющих роботов различных назначений, % (рисунок авторов)

Обсуждение и заключения. Проведенный анализ робототехнических технологий, изучение мнений людей об использовании робототехнических систем позволили получить следующие результаты.

Несмотря на то, что развитие робототехники в нашей стране в настоящее время протекает невысокими темпами, интерес к робототехническим технологиям, тем не менее, с каждым годом растет. Применяются отдельные инновационные подходы к реализации проектов, появляются интересные разработки и происходит их внедрение в различные сферы жизни.

Результаты проведенного опроса подтверждают наличие у молодежи повышенного интереса к созданию робототехнических систем, 80 % опрошенных имеют желание заниматься роботами как в рамках хобби, так и в рамках своей специальности, если увидят перспективу такой деятельности. При этом 65 % респондентов дали высокую оценку перспективности развития робототехнических систем. Вследствие того, что среди опрошенных было не много специалистов-робототехников, статистически не выявлена зависимость уровня знаний респондентов от их специальности. Но подтверждена гипотеза о влиянии специальности на знание того, как устроены и работают роботы. Лишь 26 % респондентов неинженерных специальностей выставили себе невысокие оценки за эти знания. Среди опрошенных, имеющих инженерные специальности, отмечены респонденты с высоким уровнем знания того, как устроены и функционируют роботы. Также важно подчеркнуть, что среди опрошенных, имеющих инженерные специальности, оказалось меньше респондентов с невысоким уровнем знания роботов (до 4-го уровня знаний), чем можно было ожидать. И, наоборот, опрошенных с высоким уровнем таких знания больше, чем предполагалось.

Невысокий уровень знаний в области робототехнических технологий, который в целом отметили респонденты, с одной стороны, не является препятствием для дальнейшего развития этих технологий из-за высокой степени мотивации опрошенных изучать и создавать роботов, а также из-за наличия специалистов в этой области. С другой стороны, именно повышение уровня знаний может способствовать ликвидации настороженности в отношении роботов, похожих на человека, и опасений, связанных с мыслью о возможности вытеснения роботами человека с его рабочего места.

Для решения социальных проблем, связанных с распространением роботов, в России с этой целью создаются правовые условия в рамках «регуляторных песочниц», робототехника входит в перечень технологий, применяемых в рамках экспериментальных правовых режимов в сфере цифровых инноваций. Все это, наряду с усилиями вузов, которые готовят специалистов в области робототехнических систем, позволяет надеяться, что такие технологии будут еще активнее развиваться, а их внедрение в производство и повседневную жизнь будет идти более высокими темпами.

Список литературы

1. Кайснер, Э. Робототехника: прорывные технологии, инновации, интеллектуальная собственность / Э. Кайснер, Д. Раффо, С. Вунш-Винсент // Форсайт : [сайт]. — 2016. — Т. 10, № 2. — С. 7–27. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/robototehnika-proryvnye-tehnologii-innovatsii-intellektualnaya-sobstvennost (дата обращения: 10.10.2021).

2. Конвергенция биологических, информационных, нано- и когнитивных технологий: вызов философии (материалы «круглого стола») / В. А. Лекторский, Б. И. Пружинин, И. Ю. Алексеева [и др.] // Вопросы философии. — 2012. — № 12. — С. 3–23.

3. Манько, С. В. Концепция построения мультиагентных робототехнических систем / С. В. Манько, В. М. Лохин, М. П. Романов // Российский технологический журнал. — 2015. — Т. 1, № 3 (8). — С. 156–65.

4. Колпаков, С. Г. Классификация роботов по использованию, передвижению и компонентам / С. Г. Колпаков, А. Д. Мячиков // Молодой ученый : [сайт]. — 2017. — № 3 (137). — С. 241–244. — URL: https://moluch.ru/archive/137/36438/ (дата обращения: 01.11.2022).

5. RoboLaw: Towards a European Framework for Robotics Regulation / E. Palmerini, A. Bertolini, F. Battaglia [et al.] // Robotics and Autonomous Systems. — 2016. — Vol. 86. — P. 78–85. https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.08.026

6. Жилина, И. Ю. Мировой рынок робототехники: состояние и перспективы / И. Ю. Жилина // Социальные и гуманитарные науки: Отечественная и зарубежная литература. Серия 2: Экономика. Реферативный журнал : [сайт]. — 2020. — № 1. — С. 118–126. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mirovoy-rynok-robototehniki-sostoyanie-i-perspektivy/viewer (дата обращения: 14.10.2021).

7. Синяков, Д. К. Темпы развития робототехники в России / Д. К. Синяков, О. Р. Ачкасов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : [сайт]. — 2016. — Т. 1, № 12. — С. 33–55. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tempy-razvitiya-robototehniki-v-rossii (дата обращения: 24.10.2021).

8. Параскевов, А. В. Современная робототехника в России: реалии и перспективы (обзор) / А. В. Параскевов, А. В. Левченко // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2014. — № 104. — С. 1680–1701. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-robototehnika-v-rossii-realii-i-perspektivy-obzor (дата обращения: 07.11.2021).

9. Комиссина И. Н. Современное состояние и перспективы развития робототехники в Китае / И. Н. Комиссина // Проблемы национальной стратегии : [сайт]. — 2020. — № 1 (58). — С. 123–145. — URL: https://riss.ru/documents/852/f26f688f72f144138a9f4eb5e28cf729.pdf (дата обращения: 11.11.2021).

10. Диане, С. А. К. Интеллектуальные роботы и многоагентные робототехнические системы: перспективы социальной интеграции / С. А. К. Диане // Философские проблемы информационных технологий и киберпространства : [сайт]. — 2016. — № 2 (12). — С. 74–83. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-roboty-i-mnogoagentnye-robototehnicheskie-sistemy-perspektivy-sotsialnoy-integratsii (дата обращения: 25.11.2021).

Поступила в редакцию 30.09.2022.
Поступила после рецензирования 20.10.2022.
Принята к публикации 20.10.2022.

Об авторах:

Ядровская Марина Владимировна, доцент кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID, marinayadrovskaia@rambler.ru

Гурин Илья Васильевич, магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника» Ростовского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, GurinIV86@yadex.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Ядровская — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, анализ результатов исследования, подготовка текста, корректировка выводов. И. В. Гурин — проведение расчетов, работа с литературой, подготовка текста, анализ результатов исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





Check for updates
УДК 621.822.17
Научная статья
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372



Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку

В. В. Василенко, В. И. Кирищиева, М. А. Мукутадзе ✉, В. Е. Шведова
Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2
✉ murman1963@yandex.ru

Аннотация
Введение. В современных тяжелонагруженных узлах трения широко применяются металлополимерные подшипники с антифрикционными покрытиями, работающими в режиме граничного трения. Их успешное применение обеспечивается вязкоупругой деформацией этих покрытий под нагрузкой. Для перехода от граничного трения к жидкостному необходимо создать несущий гидродинамический клин. В настоящее время применение подшипников скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку, сдерживается отсутствием методики их расчета. Настоящая работа посвящена анализу модели движения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения с нестандартным опорным профилем, имеющим на опорной поверхности фторопластсодержащее композиционное полимерное покрытие с канавкой. Цель исследования — установить зависимость устойчивого гидродинамического режима от ширины канавки на поверхности опорного профиля.
Материалы и методы. Трибологические испытания радиальных подшипников с нестандартным опорным профилем, имеющим на поверхности полимерное покрытие с канавкой, выполнялись на образцах в виде частичных вкладышей (колодок). С помощью уравнения движения смазочного материала, обладающего микрополярными реологическими свойствами, а также уравнения неразрывности получены новые математические модели, учитывающие ширину канавки, полимерное покрытие и нестандартный опорный профиль.
Результаты исследования. Достигнуто существенное расширение возможностей применения на практике расчетных моделей радиальных подшипников скольжения с конструктивными изменениями. Подшипники с полимерным покрытием с канавкой обеспечивают гидродинамический режим смазывания. Полученные результаты позволяют провести оценку эксплуатационных характеристик подшипника: величины гидродинамического давления, нагрузочной способности и коэффициента трения.
Обсуждение и заключения. Конструкция радиального подшипника с полимерным покрытием и канавкой шириной 3 мм на поверхности втулки обеспечила стабильное всплытие вала на гидродинамическом клине, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Эксперименты проводились для подшипников скольжения диаметром 40 мм с канавкой шириной 1–8 мм, при скорости скольжения 0,3–3 м/с и нагрузке 4,8–24 МПа.

Ключевые слова: радиальный подшипник, повышение износостойкости, антифрикционное полимерное композиционное покрытие, канавка, гидродинамический режим, верификация, микрополярный смазочный материал, нестандартный опорный профиль.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководителю лаборатории кафедры «Теоретическая механика» академику Российской академии наук Колесникову Владимиру Ивановичу за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Для цитирования: Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющим канавку / В. В. Василенко, В. И. Кирищиева, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 365–372. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372

Original article

Investigation of the Wear Resistance of a Journal Bearing with Polymer-Coated Grooved Support Ring

Vladimir V. Vasilenko, Victoria I. Kirishchieva, Murman A. Mukutadze ✉, Valentina E. Shvedova
Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ murman1963@yandex.ru

Abstract
Introduction. In modern heavy-loaded friction units, metallopolymer coated bearings operating in the boundary friction mode are widely used. Their successful application is provided by the viscoelastic deformation of these coatings under load. To pass from boundary friction to liquid friction, it is required to create a bearing hydrodynamic wedge. Currently, the use of journal bearings with polymer-coated grooved support ring is hindered by the lack of a methodology for their calculation. This work analyzes a model of movement of a micropolar lubricant in the operating clearance of a journal bearing with a nonstandard support profile having a PTFE composite coating with a groove on the bearing surface. The study aims at establishing the dependence of the stable hydrodynamic regime on the width of the groove on the surface of the bearing profile.
Materials and Methods. Tribological tests of journal bearings with a nonstandard bearing profile having a polymer coating with a groove on the surface were carried out on samples in the form of partial bushes (blocks). Using the equation of movement of a lubricant with micropolar rheological properties, as well as the continuity equation, new mathematical models were obtained that took into account the width of the groove, polymer coating, and nonstandard bearing profile.
Results. A significant expansion of the applicability of design models of journal bearings with structural changes has been achieved. Polymer-coated bearings with a groove provided a hydrodynamic lubrication mode. The results obtained allowed us to evaluate the operational characteristics of the bearing: hydrodynamic pressure value, load capacity, and coefficient of friction.
Discussion and Conclusions. The design of polymer coated journal bearing and a groove 3 mm wide on the surface of the liner provided a stable ascent of the shaft on the hydrodynamic wedge, which was validated experimentally. The experiments were carried out for journal bearings with a diameter of 40 mm with a groove 1–8 mm wide, at a sliding speed of 0.3–3 m/s and a load of 4.8–24 MPa.

Keywords: journal bearing, increased wear resistance, antifriction polymer composite coating, groove, hydrodynamic mode, verification, micropolar lubricant, nonstandard bearing profile.

Acknowledgements. The authors would like to thank Vladimir I. Kolesnikov, Head of the laboratory of the Theoretical Mechanics Department, Don State Technical University, Academician of the Russian Academy of Sciences, for his assistance in conducting experimental research.

For citation. V. V. Vasilenko, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova. Investigation of the Wear Resistance of a Journal Bearing with Polymer-Coated Grooved Support Ring. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 365–372. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372

Введение. Вопросы обеспечения надежности машин и механизмов являются одними из основных в современной промышленности. Для увеличения ресурса технических устройств разрабатываются новые и совершенствуются уже имеющиеся технологии и методы расчета, повышающие износостойкость, экономические и эксплуатационные характеристики.

Известно, что наиболее частой причиной отказов узлов трения являются износ и неисправность, причем доля отказов доходит до 80 %. Исследования, проводимые в области узлов трения, предлагают применение новых антифрикционных покрытий, современных разновидностей материалов, оригинальных конструктивных особенностей узлов трения.

Изначально при расчетах и проектировании закладываются качества узлов трения, при этом методологии моделирования постоянно развиваются и совершенствуются [1–5]. Параметры, влияющие на узлы трения, постоянно изменяются в соответствии с условиями их работы и материалами, используемыми для получения защитного покрытия на контактных поверхностях [6–10]. При этом возникает потребность в новых методах для адекватного моделирования и экспериментальной проверки полученных моделей.

Из основных результатов работ [11–15] следует, что при образовании вторичных структур фрикционного переноса трибологических процессов в системе «железнодорожный путь — подвижной состав» при реализации технологий металлоплакирования снижается коэффициент трения, износ и улучшаются вибропоглощающие свойства. Установлено, что поперечная деформация твердого тела снижается на 1,5 % и позволяет снизить износ колесных пар и рельсов на непрямых участках, а также повысить тяговую мощность локомотива. При этом продольная деформация твердого тела увеличивается на 60,6 %.

Результаты исследований [16, 17] посвящены разработке математической модели радиальных подшипников скольжения конечной длины и демпферов с пористыми конструктивными элементами на поверхности подшипниковой втулки. Полученные результаты исследования позволяют увеличить несущую способность на 20–22 % и снизить коэффициент передачи демпфера на 15–17 %, а коэффициент трения на 13–15 %.

В работе[1] показано, что использование легкоплавкого покрытия на поверхности подшипниковой втулки в качестве дополнительного смазочного материала с учетом его реологических свойств и расплава покрытия, обладающих истинновязкими реологическими свойствами, увеличивает время работы подшипников в гидродинамическом режиме трения на 10–12 % и предотвращает аварийный недостаток смазочного материала [18].

Для установления рационального сочетания состава металлических сплавов для покрытий подвижных и неподвижных контактных поверхностей трибоузлов и типа смазочного материала в работах [19–21] разработаны расчетные модели, которые обеспечивают наиболее эффективный режим гидродинамического смазывания как в штатном, так и в аварийном режиме при «голодном смазывании». В результате установлено, что степень улучшения для нагрузочной способности составляет 26,2 %, для коэффициента трения — 12,8 %.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости разработки новых расчетных моделей подшипников, либо повышении точности уже имеющихся. Особенностью полученных авторами расчетных моделей подшипников скольжения является обобщение в едином блоке целого комплекса дополнительных факторов, рассматриваемых ранее только индивидуально.

Цель исследования — установление закономерностей устойчивого гидродинамического режима за счет ширины канавки на поверхности опорного профиля путем нанесения полимерного покрытия.

Постановка задачи. Изучается ламинарное течение микрополярной жидкости в зазоре радиального подшипника между цапфой и нестандартным опорным профилем, на котором находится полимерное покрытие с канавкой. При этом скорость вращения цапфы равняется Ω, а скорость втулки равняется нулю в условиях адиабатического процесса.

Движение микрополярной смазки задается общеизвестным уравнением в приближении «для тонкого слоя» и уравнением неразрывности:

$$\left(2\mu' + \kappa'\right)\left(\frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'}\frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}\right) = \frac{1}{r'}\frac{dp_i'}{d\theta} - \kappa'\,\frac{\partial' v_{r_i'}}{\partial r'};$$

$$\gamma'\left(\frac{\partial^2 \upsilon_i'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'}\frac{\partial \upsilon_i'}{\partial r'}\right) = \kappa'\upsilon_i' + \kappa'\frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}, \qquad \frac{\partial v_{r_i'}'}{\partial r'} + \frac{v_{r_i'}}{r'} + \frac{1}{r'}\frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0. \tag{1}$$

В полярной системе координат (рис. 1) с полюсом в центре подшипниковой втулки уравнение контура цапфы, подшипниковой втулки с некруговым профилем опорной поверхности и подшипниковой втулки с нестандартным опорным профилем, на котором находится полимерное покрытие, зададим в виде:

$$r' = r_0\left(1 + H\right); \quad r' = r_1 - a'\sin\omega\theta; \quad r' = r_1 - \tilde{h} - a'\sin\omega\theta. \tag{2}$$

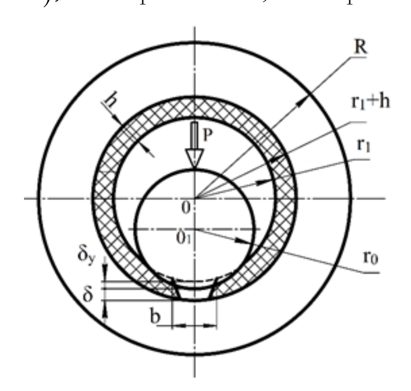


Рис. 1. Радиальный подшипник, имеющий на опорной поверхности полимерное покрытие с канавкой (рисунок авторов)

[1] Лагунов Е. О., Мукутадзе В. А. Радиальные подшипники скольжения, обусловленные расплавом // Труды IV Международной научно-технической конференции «ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ». Челябинск : Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). 2018. С. 56–62.

Общепринятые граничные условия с точностью до членов $O\left(\varepsilon^2\right)$:

$$v_\theta = 0;\quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 - a'\sin\omega\theta;\quad \theta_1 < \theta < \theta_2;$$

$$v_\theta = 0,\quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h} - a'\sin\omega\theta;\quad 0 \le \theta \le \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \le \theta \le 2\pi;$$

$$v_\theta = r_0\Omega;\ v'_{r'} = -\Omega e\sin\theta \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e\cos\theta;$$

$$p(0) = p(\theta) = p_g. \tag{3}$$

Для того, чтобы сделать решение более простым, перейдем к безразмерным величинам:

$$r' = r_1 - \delta r;\quad \delta = r_1 - r_0;\quad r' = \left(r_1 - \tilde{h}\right) - \delta r;$$

$$\delta = \left(r_1 - \tilde{h}\right) - r_0;\quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i;\quad v_{r'_i} = \Omega\delta u;$$

$$p' = p^* p;\quad p^* = \frac{(2\mu + \kappa)\Omega r_0^2}{2\delta^2};\quad \upsilon' = \upsilon;\quad \mu' = \mu;\quad \kappa' = \kappa;\quad \gamma' = \gamma;$$

$$N^2 = \frac{\kappa}{2\mu + \kappa};\quad N_1 = \frac{2\mu l^2}{\delta^2\kappa};\quad l^2 = \frac{\gamma}{4\mu}. \tag{4}$$

При учете (4), уравнения (1) и (3) преобразуются в систему безразмерных уравнений с соответствующими граничными условиями, но следует учитывать условие постоянства расхода смазочного материала:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2\frac{\partial\upsilon_i}{\partial r} = e^{-\alpha p}\frac{dp_i}{d\theta};\qquad \frac{\partial^2\upsilon_i}{\partial r^2} = \frac{\upsilon_i}{N_1} + \frac{1}{N_1}\frac{du_i}{dr};\qquad \frac{\partial u_i}{\partial\theta} + \frac{\partial v_i}{\partial r} = 0; \tag{5}$$

$$v = 1;\quad u = -\eta\sin\theta;\quad \upsilon = 0 \ \text{при}\ r = 1 - \eta\cos\theta;$$

$$v = 0;\quad u = 0;\quad \upsilon = 0 \ \text{при}\ r = \eta_1\sin\omega\theta;\quad \theta_1 \le \theta \le \theta_2;$$

$$v = v^*(\theta);\quad u = u^*(\theta);\quad \upsilon = 0 \ \text{при}\ r = \eta_2 + \eta_1\sin\omega\theta;\quad 0 \le \theta \le \theta_1 \ \text{и}\ \theta_2 \le \theta \le 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \tag{6}$$

где $\eta = \dfrac{e}{\delta};\quad \eta_1 = \dfrac{a'}{\delta};\quad \eta_2 = \dfrac{\tilde{h}}{\delta}.$

Решение задачи (5) с учетом граничных условий (6) ищем по известному методу [20, 21] в виде:

$$v_i = \frac{\partial\psi_i}{\partial r} + V_i(r,\theta);\quad u_i = -\frac{\partial\psi_i}{\partial\theta} + U_i(r,\theta);$$

$$\psi_i(r,\theta) = \tilde{\psi}(\xi_i);\quad \xi_2 = \frac{r}{h(\theta)} \ \text{при}\ \theta_1 \le \theta \le \theta_2;$$

$$V_i(r,\theta) = \tilde{v}_i(\xi_i);\quad U_i(r,\theta) = -\tilde{u}_i(\xi_i)\cdot h'(\theta);$$

$$\xi_{1,3} = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \ \text{при}\ 0 \le \theta \le \theta_1 \ \text{и}\ \theta_2 \le \theta \le 2\pi, \tag{7}$$

где $h(\theta) = 1 - \eta\cos\theta - \eta_1\sin\omega\theta$.

Для гидродинамического давления и поля скоростей получим следующие аналитические выражения:

$$\tilde{\psi}'_i(\xi_i) = a_1\frac{\xi_i}{2}(\xi_1 - 1),\quad \tilde{u}_i(\xi_i) = b_1\frac{\xi_i^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1}\left(\frac{\xi_1^3}{3} - \frac{\xi_1^2}{2}\right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_1}{2} + 1\right)\xi_1;$$

$$p_1 = \frac{p_g}{p^*} + 6\left(1 + \alpha\frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\left(-\tilde{\eta}\sin\theta + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega}(\cos\omega\theta - 1) + \frac{\tilde{\eta}_1\theta}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - 1)\right);$$

$$\tilde{\psi}'_2(\xi_2) = a_2\frac{\xi_2}{2}(\xi_2 - 1),\quad \tilde{u}_2(\xi_2) = b_2\frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1}\left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2}\right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_2}{2} + 1\right)\xi_2 + 1;$$

$$p_2 = \frac{p_g}{p^*} + 6\left(1 + \alpha\frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\left[(\theta - \theta_1)\left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi}\right)\left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - \cos\omega\theta_1) + \right.\right.\right.$$

$$+\frac{\eta}{2\pi}\sin\theta_1\Big)\Big)+\left(1-\frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right)\left(\frac{\eta_1}{\omega}\left(\cos\omega\theta-\cos\omega\theta_1\right)+\eta\left(\sin\theta-\sin\theta_1\right)\right)\Bigg];$$

$$\tilde{\psi}_3'(\xi_3)=a_3\frac{\xi_3}{2}(\xi_3-1),\quad \tilde{u}_3(\xi_3)=b_3\frac{\xi_3^2}{2}-\frac{N^2}{2N_1}\left(\frac{\xi_3^3}{3}-\frac{\xi_3^2}{2}\right)-\left(\frac{N^2}{12N_1}+\frac{b_3}{2}+1\right)\xi_3+1;$$

$$p_3=\frac{p_g}{p^*}+6\left(1+\alpha\frac{p_g}{p^*}-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\Bigg[(\theta-\theta_2)\Bigg(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2}-\left(1-\frac{5\theta_2}{2\pi}\right)\Bigg(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega}\left(\cos 2\pi\omega-\cos\omega\theta_2\right)-$$

$$-\frac{\tilde{\eta}}{2\pi}\sin\theta_2\Big)\Big)+\left(1-\frac{3\theta_2^2}{4\pi^2}\right)\left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega}\left(\cos\omega\theta-\cos\omega\theta_2\right)+\tilde{\eta}\left(\sin\theta-\sin\theta_2\right)\right)\Bigg]. \quad (8)$$

Определяя несущую способность и силу трения используем следующие формулы:

$$R_x=\frac{6(\mu+\kappa)\omega r_0^3}{2\delta^2}\left[\int_0^{\theta_1}p_1\cos\theta d\theta+\int_{\theta_1}^{\theta_2}p_2\cos\theta d\theta+\int_{\theta_2}^{2\pi}p_3\cos\theta d\theta\right].$$

$$R_y=\frac{6(\mu+\kappa)\omega r_0^3}{2\delta^2}\left[\int_0^{\theta_1}p_1\sin\theta d\theta+\int_{\theta_1}^{\theta_2}p_2\sin\theta d\theta+\int_{\theta_2}^{2\pi}p_3\sin\theta d\theta\right].$$

$$L_{\text{тр}}=(\mu+\kappa)\Omega r_0^2\left[\int_0^{\theta_1}\left(\frac{\tilde{\psi}_1''(0)}{\left(h(0)-\eta_2\right)^2}+\frac{\tilde{v}_1'(0)}{\left(h(0)-\eta_2\right)}\right)d\theta+\int_{\theta_1}^{\theta_2}\left(\frac{\tilde{\psi}_2''(0)}{h^2(0)}+\frac{\tilde{v}_2'(0)}{h(0)}\right)d\theta+\right.$$

$$\left.+\int_{\theta_2}^{2\pi}\left(\frac{\tilde{\psi}_3''(0)}{\left(h(0)-\eta_2\right)^2}+\frac{\tilde{v}_3'(0)}{\left(h(0)-\eta_2\right)}\right)d\theta\right]. \quad (9)$$

Численный анализ (9) был проведен при следующих диапазонах значений: $(\theta_2 - \theta_1) = 5{,}74–22{,}92$ (ширина канавки), d = 40 мм; V = 0,3–3 м/с; σ = 4,8–24 МПа; μ_0 = 0,0707–0,0076 Н·с/м^2 (масло МС-20).

Проведение эксперимента. Экспериментальное исследование состоит из:

1) верификации разработанной расчетной модели;

2) комплекса экспериментальных исследований подшипника с новой разработанной конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки.

Эксперимент был проведен на модернизированной машине трения ИИ 5018 с использованием образцов в виде частичных вкладышей. Колодки вырезались из кольцевой заготовки по центральному углу, равному 60 °. На их рабочие поверхности наносились полимерные покрытия и канавки вдоль оси трибосопряжения на глубину покрытия. Кроме того, колодки имели отверстия для термопар.

Результаты исследования. В результате теоретического исследования установлено, что несущая способность подшипника скольжения с полимерным покрытием поверхности подшипниковой втулки, содержащим канавку, а также адаптированным к условиям трения профилем опорной поверхности, была повышена на 8–9 %, а коэффициент трения снижен на 7–8 % (таблица 1).

Таблица 1

Результаты теоретического исследования поверхности опорного кольца с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием

№	σ, МПа	Коэффициент трения				
		1	2	3	4	5
1	4,8	0,00815	0,01982	0,01781	0,01056	0,00363
2	9,6	0,00614	0,01493	0,01342	0,007958	0,0027354
3	14,4	0,00413	0,01005	0,00903	0,005356	0,0018408
4	19,2	0,00212	0,00516	0,00464	0,002754	0,0009462
5	24	0,00011	0,000281	0,000253	0,0001497	0,0000516

В результате экспериментального исследования после двухминутной переработки был получен устойчивый гидродинамический режим. Нагрузка увеличивалась в пять раз с одинаковым интервалом (таблица 2).

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования поверхности опорного кольца с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием

№ п/п	Режим		Результаты теоретического исследования		Результаты экспериментального исследования		Погрешность, %	
	σ, МПа	*V*, м/с	Покрытие из полимера	Покрытие, содержащее канавку	Покрытие из полимера	Покрытие, содержащее канавку		
1	4,8	0,3	0,0160	0,0142	0,0184	0,0159	5–12	6–13
2	9,6	0,3	0,0105	0,0088	0,0119	0,0064		
3	14,4	0,3	0,0085	0,0066	0,0098	0,0078		
4	19,2	0,3	0,00100	0,0076	0,0122	0,0097		
5	24	0,3	0,0140	0,0109	0,0152	0,0123		

Результаты исследования подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей и доказывают преимущество исследованных подшипников скольжения перед существующими за счет повышения нагрузочной способности и снижения коэффициента трения.

Обсуждение и заключения. Теоретическим исследованием определено необходимое сечение маслоподдерживающих канавок для выхода в режим гидродинамического смазывания при заданной нагрузке. Затем, после установления параметров канавок, разработана расчетная модель, описывающая работу подшипника в гидродинамическом режиме для микрополярного смазочного материала, учитывающая адаптированный к условиям трения опорный профиль.

В исследуемой конструкции при вращении вала в канавке возникает циркуляционное движение смазочного материала. Возникающая при этом сила приподнимает вал и в появившемся зазоре образуется гидродинамический клин.

В соответствии с поставленной целью обоснована общая методика экспериментальных исследований как по классическим однофакторным, так и по полнофакторным планам.

Выводы.

1. В результате исследования достигнуто существенное расширение возможностей применения на практике расчетных моделей радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием, имеющим канавку, позволяющих провести оценку эксплуатационных характеристик: величины гидродинамического давления, нагрузочной способности и коэффициента трения.

2. Применение исследованных радиальных подшипников скольжения с канавкой шириной 3 мм значительно повышает их нагрузочную способность (на 8–9 %) и снижает коэффициент трения (на 7–8 %).

3. Конструкция радиального подшипника с полимерным покрытием и канавкой шириной 3 мм обеспечивает стабильное всплытие вала на гидродинамическом клине.

Условные обозначения

$v_{r_i'}$, v_{θ_i} — компоненты вектора скорости смазочной среды; υ_i' — скорость частиц в микрополярной среде; $H=\varepsilon\cos\theta-\frac{1}{2}\varepsilon^2\sin^2\theta+...$, $\varepsilon=\frac{e}{r_0}$, r_0 — радиус вала; r_1 — радиус подшипниковой втулки; $\tilde{h}$ — высота канавки; e — эксцентриситет; ε — относительный эксцентриситет; $\eta=\frac{e}{\delta}$ — конструктивный параметр подшипника со стандартным опорным профилем; $\eta_1=\frac{a'}{\delta}$ — конструктивный параметр подшипника с адаптированным профилем; $\eta_2=\frac{\tilde{h}}{\delta}$ — конструктивный параметр, характеризующий канавку; p_g — давление на торцах интервала; θ_1 и θ_2 — соответственно угловые координаты канавки; $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ — известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки.

Список литературы

1. Polyakov, R. The Method of Long-Life Calculation for a Friction Couple “Rotor – Hybrid Bearing” / R. Polyakov, L. Savin // Proc. 7th Int. Conf. on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems. — Rhodes Island : International Center for Numerical Methods in Engineering. — 2017. — P. 433–440.

2. Поляков, Р. Н. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором / Р. Н. Поляков, Л. А. Савин, А. В. Внуков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2018. — № 1 (327). — С. 66–71.

3. Predictive Analysis of Rotor Machines Fluid-Film Bearings Operability / R. Polyakov, S. Majorov, I. Kudryavcev, N. Krupenin // Vibroengineering PROCEDIA. — 2020. — Vol. 30. — P. 61–67. http://dx.doi.org/10.21595/vp.2020.21379

4. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С. С. Негматов, Н. С. Абед, Р. Х. Саидахмедов [и др.] // Пластические массы. — 2020. — № 7–8. — С. 32–36. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36

5. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication / E. P. Kornaeva, A. V. Kornaev, Yu. N. Kazakov, R. N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 734. — Art. 012154. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154

6. Shutin, D. V. Active Hybrid Bearings as Mean for Improving Stability and Diagnostics of Heavy Rotors of Power Generating Machinery / D. V. Shutin, R. N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862. — Art. 032098. 10.1088/1757-899X/862/3/032098

7. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, N. V. Zinoviev, R. A. Kornienko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900. — Art. 012009. 10.1088/1757-899X/900/1/012009

8. Харламов, П. В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 1 (81). — С. 122–129. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_122

9. Глушко, С. П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения / С. П. Глушко // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 3. — С. 253–59. — https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259

10. Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Верченко, В. М. Троицкий // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 235–242. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242

11. Харламов, П. В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 3 (83). — С. 37–45. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_3_37

12. Харламов, П. В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования / П. В. Харламов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2021. — № 12. — С. 556–560. https://doi.org/10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560

13. Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» / В. В. Шаповалов, Ю. Ф. Мигаль, А. Л. Озябкин [и др.] // Трение и износ. — 2020. — Т. 41, № 4. — С. 464–474. https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474

14. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» / В. В. Шаповалов, П. Н. Щербак, В. М. Богданов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2019. — Т. 78, № 3. — С. 177–182. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182

15. Improving the Efficiency of the Path-Rolling Stock System Based on the Implementation of Anisotropic Frictional Bonds / V. V. Shapovalov, V. I. Kolesnikov, P. V. Kharlamov [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900. — Art. 012011. 10.1088/1757-899X/900/1/012011

16. Kolesnikov, I. V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant Supply: ICIE 2018 / I. V. Kolesnikov, A. M. Mukutadze, V. V. Avilov // In: Proc. 4th Int. Conf. on Industrial Engineering. — 2019. — P. 1049–1062. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_110

17. Демпфер с пористым элементом для подшипниковых опор / К. С. Ахвердиев, А. М. Мукутадзе, Н. С. Задорожная, Б. М. Флек // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 4. — С. 502–509.

18. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 2 (66). — С. 129–135.

19. Mathematical Model for a Lubricant in a Sliding Bearing with a Fusible Coating in Terms of Viscosity Depending on Pressure under an Incomplete Filling of a Working Gap / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze, A. M. Mukutadze, N. S. Zadorozhnaya // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2021. — Vol. 50. — P. 405–411. 10.3103/S1052618821050083

20. Mukutadze, M. A. Mathematical Model of a Lubricant in a Bearing with a Fusible Coating on the Pilot and Irregular Slider Profile / M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova // In: Proc. 7th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2021). — 2022. — P. 834–840. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85233-7_97

21. Хасьянова, Д. У. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия / Д. У. Хасьянова, М. А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2022. — № 4. — С. 46–53. https://doi.org/10.31857/S0235711922040101

Поступила в редакцию 08.10.2022.
Поступила после рецензирования 07.11.2022.
Принята к публикации 07.11.2022.

Об авторах:

Василенко Владимир Владимирович, начальник учебной части, преподаватель кафедры «Железнодорожные войска», заместитель начальника Военного учебного центра при «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), ORCID, vvv_voen@rgups.ru

Кирищиева Виктория Игоревна, аспирант кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), ORCID, Milaya_vika@list.ru

Мукутадзе Мурман Александрович, заведующий кафедрой «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, murman1963@yandex.ru

Шведова Валентина Евгеньевна, аспирант кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), ORCID, Shvedovavalya@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. В. Василенко — формирование основной концепции, цели и задачи исследования. В. И. Кирищиева — проведение эксперимента, формирование выводов. М. А. Мукутадзе — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. В. Е. Шведова — проведение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT







UDC 004.11.6
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-373-383

Original article

Determinants Factors in Predicting Life Expectancy Using Machine Learning

Brou Kouame Amos, Ivan Smirnov 
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), 6, Miklikho-Maklaya St., Moscow, Russian Federation
✉ broukouameamos9@gmail.com

Abstract
Introduction. Life expectancy is, by definition, the average number of years a person can expect to live from birth to death. It is therefore the best indicator for assessing the health of human beings, but also a comprehensive index for assessing the level of economic development, education and health systems. From our extensive research, we have found that most existing studies contain qualitative analyses of one or a few factors. There is a lack of quantitative analyses of multiple factors, which leads to a situation where the predominant factor influencing life expectancy cannot be identified with precision. However, with the existence of various conditions and complications witnessed in society today, several factors need to be taken into consideration to predict life expectancy. Therefore, various machine learning models have been developed to predict life expectancy. The aim of this article is to identify the factors that determine life expectancy.
Materials and Methods. Our research uses the Pearson correlation coefficient to assess correlations between indicators, and we use multiple linear regression models, Ridge regression, and Lasso regression to measure the impact of each indicator on life expectancy. For model selection, the Akaike information criterion, the coefficient of variation and the mean square error were used. R^2 and the mean square error were used.
Results. Based on these criteria, multiple linear regression was selected for the development of the life expectancy prediction model, as this model obtained the smallest Akaike information criterion of 6109.07, an adjusted coefficient of 85 % and an RMSE of 3.85.
Conclusion and Discussion. At the end of our study, we concluded that the variables that best explain life expectancy are adult mortality, infant mortality, percentage of expenditure, measles, under-five mortality, polio, total expenditure, diphtheria, HIV/AIDS, GDP, longevity of 1.19 years, resource composition, and schooling.
The results of this analysis can be used by the World Health Organization and the health sectors to improve society.

Keywords: life expectancy, machine learning, machine learning models.

Acknowledgments. This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

For citation. Brou Kouame Amos, I. Smirnov. Determinants Factors in Predicting Life Expectancy Using Machine Learning. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 373–383. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-373-383

Научная статья

Детерминирующие факторы в прогнозировании ожидаемой продолжительности жизни с помощью машинного обучения

Бру Куамэ Амос, И. Смирнов
Российский университет дружбы народов (РУДН), Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
✉ broukouameamos9@gmail.com

Аннотация
Введение. Ожидаемая продолжительность жизни — это, по определению, среднее количество лет, которое человек может прожить от рождения до смерти. Таким образом, это лучший индикатор для оценки здоровья

людей, а также комплексный индекс для оценки уровня экономического развития, систем образования и здравоохранения. В результате нашего обширного исследования мы обнаружили, что большинство существующих исследований содержат качественный анализ одного или нескольких факторов. Отсутствует количественный анализ множества факторов, что приводит к ситуации, когда невозможно точно определить преобладающий фактор, влияющий на продолжительность жизни. Однако при наличии различных состояний и осложнений, наблюдаемых сегодня в обществе, необходимо учитывать несколько факторов для прогнозирования ожидаемой продолжительности жизни. Поэтому были разработаны различные модели машинного обучения для прогнозирования продолжительности жизни.

Целью данной статьи является выявление факторов, определяющих продолжительность жизни.

Материалы и методы. В нашем исследовании используется коэффициент корреляции Пирсона для оценки корреляций между показателями, и мы используем несколько моделей линейной регрессии, регрессию Риджа и регрессию Лассо для измерения влияния каждого показателя на ожидаемую продолжительность жизни. Для выбора модели использовали информационный критерий Акаике, коэффициент вариации и среднеквадратичную ошибку. Использовались R^2 и среднеквадратическая ошибка.

Результаты исследования. На основании этих критериев для разработки модели прогнозирования ожидаемой продолжительности жизни была выбрана множественная линейная регрессия, поскольку эта модель получила наименьший информационный критерий Акаике 6109,07, скорректированный коэффициент 85 % и среднеквадратичное отклонение 3,85.

Обсуждение и заключения. В конце нашего исследования мы пришли к выводу, что переменными, которые лучше всего объясняют ожидаемую продолжительность жизни, являются взрослая смертность, младенческая смертность, процент расходов, корь, смертность детей в возрасте до пяти лет, полиомиелит, общие расходы, дифтерия, ВИЧ/СПИД, ВВП, продолжительность жизни 1,19 года, состав ресурсов и обучение.

Результаты этого анализа могут быть использованы Всемирной организацией здравоохранения и секторами здравоохранения для улучшения общества.

Ключевые слова: ожидаемая продолжительность жизни, машинное обучение, модели машинного обучения.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Для цитирования. Бру Куамэ Амос, И. Смирнов. Детерминирующие факторы в прогнозировании ожидаемой продолжительности жизни с помощью машинного обучения. Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 373–383. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-373-383

Introduction

Human life expectancy can be understood as a statistic used in demography to estimate the average age at which people in a given region and at a given time can be expected to live under current conditions [1]. Life expectancy is not only a statistical indicator of human health, but also a means of assessing the degree of economic, educational, health [2] and environmental development. It should be noted that the World Health Organization (WHO) considers life expectancy to be a key, if not the most important, indicator of health, reflecting the instruments of human existence [3–6]. In the majority of the world countries, life expectancy has in fact increased. Global life expectancy increased from 67.2 years in 2005 to 70.8 years in 2015[1]. The United Nations and individual national governments now have the optimization of human life expectancy, health and well-being as their main objective [7–8]. The UN has been a strong promoter of human health by providing sanitary remedies, which greatly improves the urban environment and helps developing countries[2]. In the African region of the World Health Organization, life expectancy is 61.2 years, while in the European region, it is 77.5 years, giving a ratio of 1.3 between the two regions [9]. Analysis of the disparities in life expectancy between developed and developing countries will enable the United Nations to improve its health promotion and humanitarian assistance activities. It will also enable governments of different nations to establish more effective policies to increase life expectancy and improve living standards. States would be able to significantly increase the life expectancy of their population by investing more in the health care system [7]. According to [10], the increase in life expectancy in the United States as a function of per capita income is substantially related to the increase in income level. According to some researchers, the relevant factors affecting life expectancy are mainly environmental, social and economic factors. These vary according to location and involve economic development, medical and health requirements. Existing research has

[1] United Nations Statistical Yearbook, 2017 edition. United Nations, New York; 2017.
[2] United Nations Economic and Development website: https://www.un.org/chinese/esa/health.htm (accessed: 9 February, 2021)

given rise to debates about the factor that determines life expectancy. In [11], the author analysed life expectancy in Tibet, China, and found the main factors determining life expectancy. The author in [12], thought that social economy played an important role in determining life expectancy in the early stages of development. However, it was replaced by diet and lifestyle when economic development reached a certain level. The article [13] considered that the determining factor in the evolution of life expectancy in Eastern Europe was lifestyle.

In the end, several studies have identified numerous factors influencing life expectancy. However, few studies compared economic development with environmental factors to analyse the intensity of their impact on life expectancy. Several studies are trying to find out the determining factor of life expectancy. It must be said that there are several. Epidemiological studies in developed countries reveal large differences in life expectancy that are often highly complex. A current study in the United States suggests that 10 to 38 % of the differences in life expectancy can be explained by work-related stress. Life expectancy depends on many factors such as economic status, regional changes in education, gender disparities, physical and mental illnesses, alcohol consumption, GDP, health care spending, and many other demographic factors. Life expectancy has actually increased during the 20th and 21st centuries in industrialized countries [14–20]. The improvement in life expectancy in Europe is followed by a population growth in the over-50 age group. There were 179 million people aged 50 or over in all EU Member States in 2008, and 195 million in 2014, with women accounting for about 55 % of the total [21–24].

According to some sources, the level of economic development has a significant effect on life expectancy. Indeed, studies have shown that people who are financially well off and those from wealthy families tend to have a higher life expectancy [25, 26]. For some researchers, other economic development variables such as GDP per capita [27, 28], urbanisation rate [29] and level may affect life expectancy to different degrees. Some studies show that environmental factors are determinants of life expectancy [29]. Indeed, according to [29, 30], most environmental factors, such as ecological resilience and environmental sustainability, are positively correlated with life expectancy, while some factors, including biodiversity, are negatively correlated with life expectancy. In [31], current environmental conditions influence the life expectancy of the population at birth, while cumulative changes in circumstances continue to influence the remaining life expectancy of the population at different ages over time. J. O. Anderson in [32] thought that people living in an environment with high levels of particulate pollutants over a long period of time had higher cardiovascular morbidity, and that there was some degree of dose dependence. Other researchers have studied the impact of different environmental variables on life expectancy. A. Wuffle [33] compared the average temperature of all US states. The results showed that the lower the average temperature in November, the higher the life expectancy of the population in those states [34–36].

Therefore, through machine learning, we will determine the factors that influence life expectancy. Machine learning (ML) can be understood as a discipline that lies at the intersection of mathematics, statistics and computer science. Machine learning has played an important role in the development of artificial intelligence (AI). Thus, artificial intelligence, through machine learning, helps companies to prevent problems and increase profits. In the field of health, machine learning is still surprising researchers. It is now the most widely used tool for prediction and forecasting. Machine learning, which represents a cutting-edge technology due to its predictive accuracy in several problems, is widely used to increase life expectancy by reducing the mortality rate [17]. Indeed, given that several elements impact on life expectancy, the multiple regression model is of paramount importance and corresponds to the exploration of the specific relationship and level of impact between several factors and life expectancy.

This paper uses multiple linear regression models and Pearson's correlation coefficient to examine the relationship between several variables on life expectancy and provide more help for future research on both sides. These models are also used as a basis for suggestions to states for improving life expectancy in order to achieve a development of human society.

Materials and Methods

The World Health Organization (WHO) Global Health Observatory (GHO) data repository tracks health status and many other related factors for all countries. The datasets are made available to the public for analysis of health data. Data on life expectancy and health factors for 193 countries were collected on the same WHO website and the corresponding economic data were collected on the UN website. From all categories of health-related factors, only the most representative critical factors were selected. It has been observed that in the last 15 years, the health sector has undergone enormous development, resulting in improved human mortality rates, especially in developing countries, compared to the last 30 years. Therefore, in this project, we considered data from the year 2000 to 2015 for 193 countries for further analysis. The individual data files were merged into a single dataset. Initial visual inspection of the data revealed some missing values. As the datasets were from WHO, we did not find any obvious errors.

Our dataset had missing data, and the missing data were for population, hepatitis B and GDP. Imputation of missing data using the *mice* function in the R package of the same name.

Each variable is associated with an imputation model, conditional on the other variables in the data set: if we have X_k variables, the missing data for the variable X_i will be replaced by the predictions of a model created from the other variables.

The final file is composed of 22 attributes, the target variable "life expectancy" and various other social factors, such as total expenditure on life, population, education and health factors, such as BMI, measles, etc. These data are available on Kaggle [18]. All predictors were then divided into several broad categories: vaccination-related factors, mortality factors, economic factors, and social factors.

Data mining

The objective of this section is to gain a better understanding of the data by extracting information from the data. We mainly want to determine the relationship between the variables.

The correlation matrix, visualized using a heat map (as shown in Figure 1), is one of the best ways to understand the correlation between variables. It is plotted using the R library "Reshape2" and shows us the strength of the linear relationships between the variables. The linear relationship between the outcome and the characteristics can be estimated by a correlation matrix. In multivariate analysis, it plays an important role, as it elaborates the relationship between the different components [19]. Looking at Figure 1, we can see that:

the target variable Life expectancy is strongly correlated (positively or negatively) with:

– Adult mortality (-0.70);

– HIV/AIDS (-0.56);

– Composition of income resources (0.72);

– Schooling (0.75).

There is also a very low correlation between the target variable Life Expectancy and Population (-0.02) or no correlation at all.

The child deaths variable is extremely positively correlated with deaths under five years of age (1.00).

The GDP variable and the percentage of expenditure are positively correlated (0.90).

The Hepatitis B variable is moderately positively correlated with Polio and Diphtheria (0.49) and (0.61).

The variables diphtheria and polio are strongly positively correlated (0.67).

The HIV/AIDS variable is negatively correlated with resource composition (-0.25).

The thinness variable 10 ... 19 years is very strongly positively correlated with the thinness variable 5 ... 9 years (0.94).

The variable Schooling and the income composition of resources are very strongly correlated (0.8).

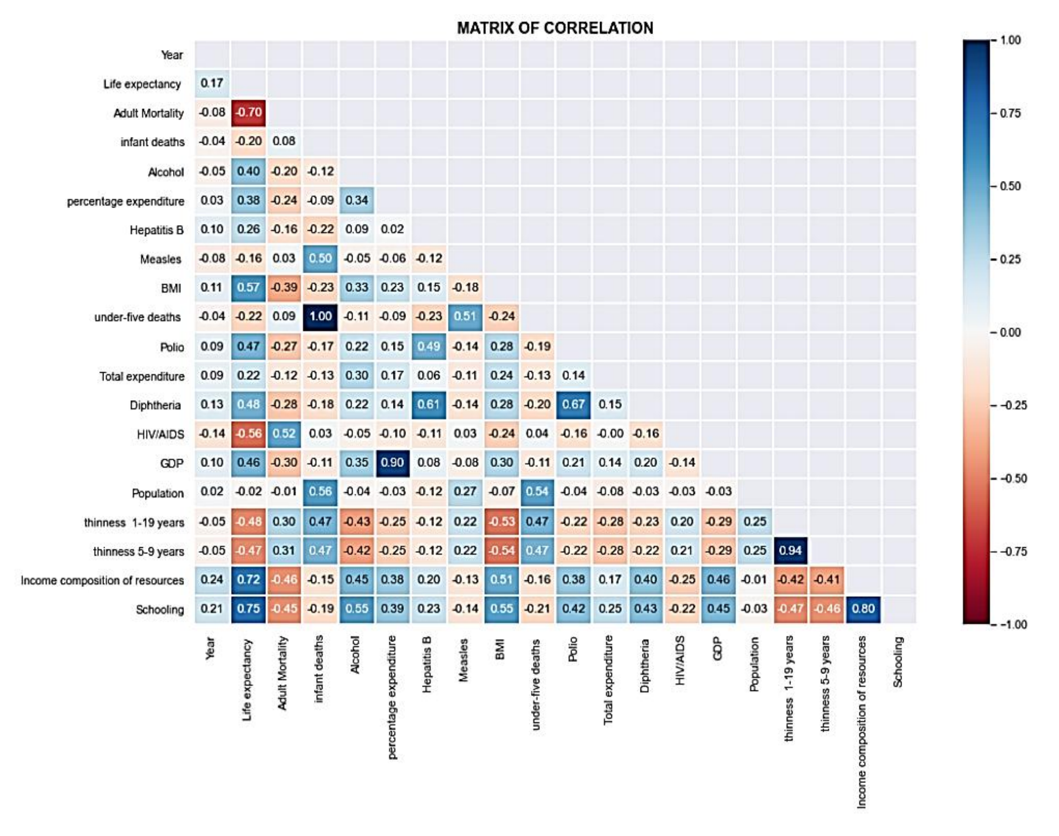


Fig. 1. Visualisation of the correlation matrix by heat map (figure by authors)

By examining the correlation coefficients in Figure 1, we detect potential predictors of life expectancy. For each numerical variable that is potentially predictive of life expectancy, we will run a simple linear regression between it and the life expectancy variable, display the Pearson correlation coefficient and its P

y = a$x + b$. y is the dependent variable and x is the independent variable. a and b are the model parameters (a is the slope of the fitted line and b is the intercept).

From the result of this exploratory analysis on our data, we concluded that adult mortality, HIV/AIDS, BMI, income composition, and education are the most important factors in predicting life expectancy. This selection was made on the basis of the Pearson correlation coefficient and p-value (as shown in Figures 2, 3, 4, 5, 6).

– The correlation between the variable infant mortality, GDP, alcohol, percentage of expenditure, hepatitis B, measles, under-five deaths, polio, total expenditure, diphtheria, population, age 1–19, age 5–9, and life expectancy is statistically significant as their p-values are less than 0.001, but the linear relationship between these variables is weak with a Pearson correlation coefficient of less than 0.5. Under these conditions, the variables child deaths, GDP, alcohol, percentage of expenditure, hepatitis B, measles, under-five deaths, polio, total expenditure, diphtheria, population, leanness 1–19 years, leanness 5–9 years, cannot be considered as a predictor of life expectancy.

– There is a strong negative correlation between the variables Adult Mortality and Life Expectancy with a Pearson correlation coefficient of –0.7 and statistically significant since the p-value is less than 0.001. In other words, as adult mortality increases, life expectancy decreases. Under these conditions, the adult mortality variable can be considered a predictor of life expectancy.

– There is a negative correlation between the variables HIV/AIDS and life expectancy with a Pearson correlation coefficient of -0.56 and statistically significant since the p-value is less than 0.001. As the number of people affected by HIV/AIDS increases, life expectancy decreases. Under these conditions, the HIV/AIDS variable can be considered a predictor of life expectancy.

– There is a positive correlation between the BMI and life expectancy variables with a Pearson correlation coefficient of 0.56 and statistical significance since the p-value is less than 0.001. Under these conditions, the BMI variable can be considered a predictor of life expectancy.

– There is a strong positive correlation between the variables Income composition of resources and life expectancy with the Pearson correlation coefficient of 0.69 and statistically significant as the p-value is less than 0.001. The graph shows that as the composition of income increases, life expectancy increases. Under these conditions, the variable Income composition of resources can be considered as a predictor of life expectancy.

– There is a strong positive correlation between the variables Education and Life Expectancy with a Pearson correlation coefficient of 0.72 and statistically significant as the p-value is less than 0.001. The graph shows that the higher the education, the higher the life expectancy. Under these conditions, the education variable can be considered a predictor of life expectancy.

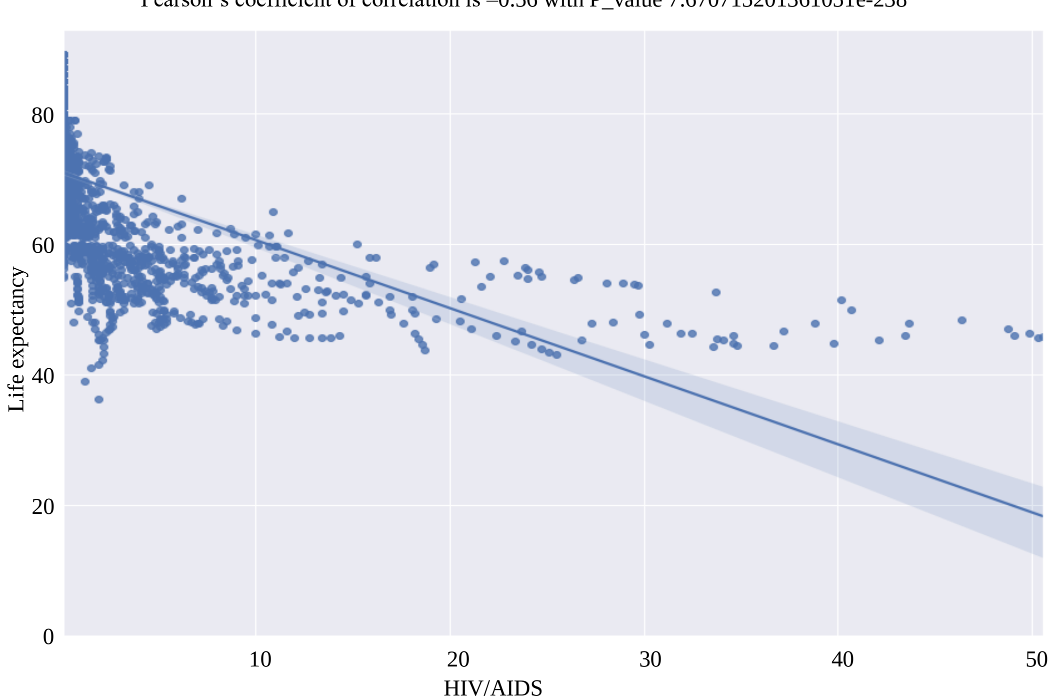


Fig. 2. Correlation between life expectancy and HIV/AIDS variable (figure by authors)

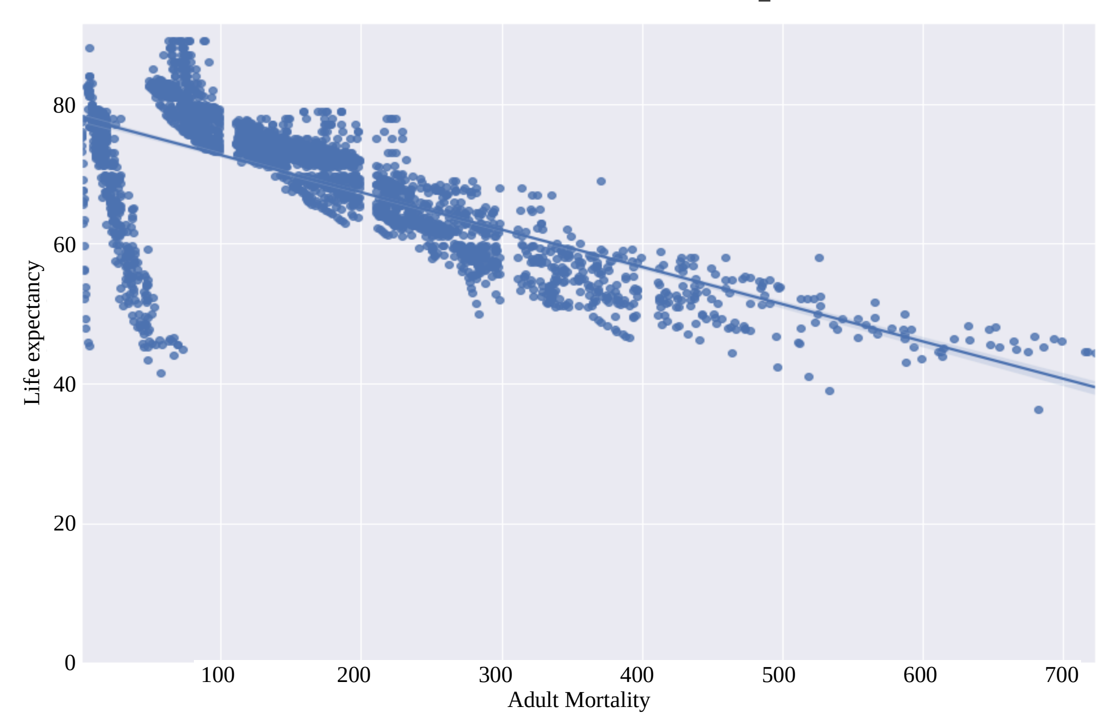


Fig. 3. Correlation between life expectancy and the adult mortality variable (figure by authors)



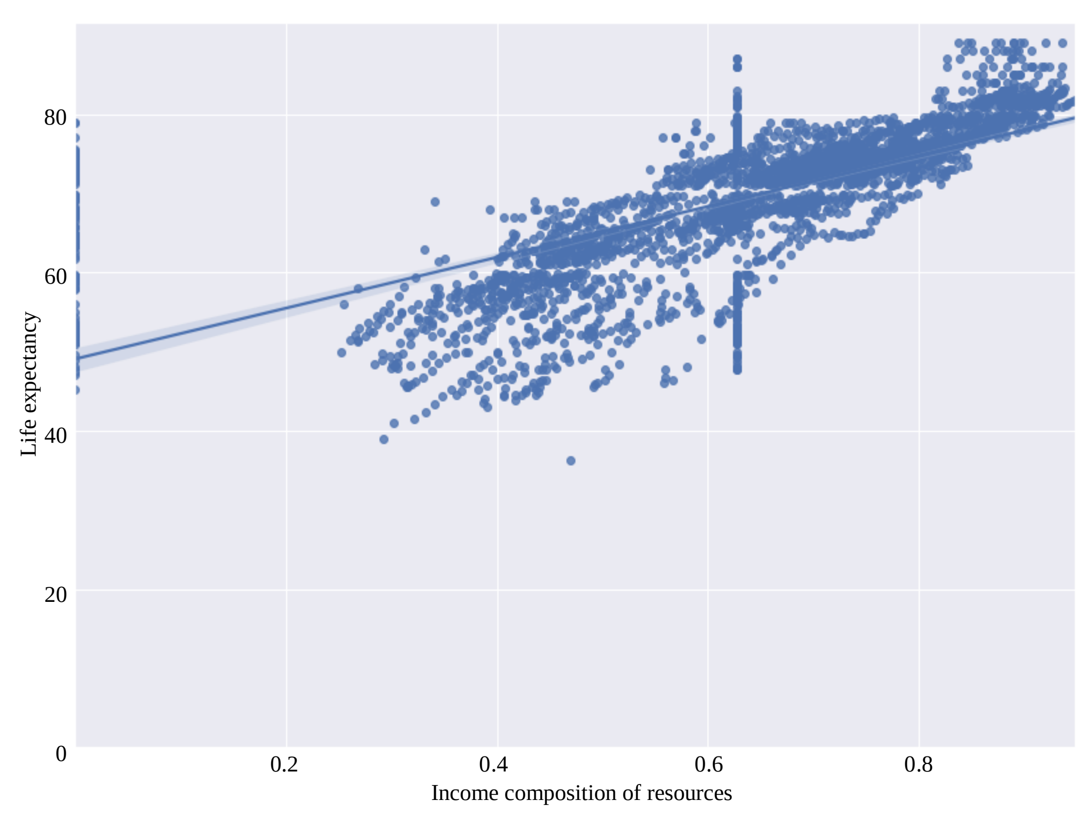


Fig. 4. Correlation between life expectancy and the income composition variable (figure by authors)

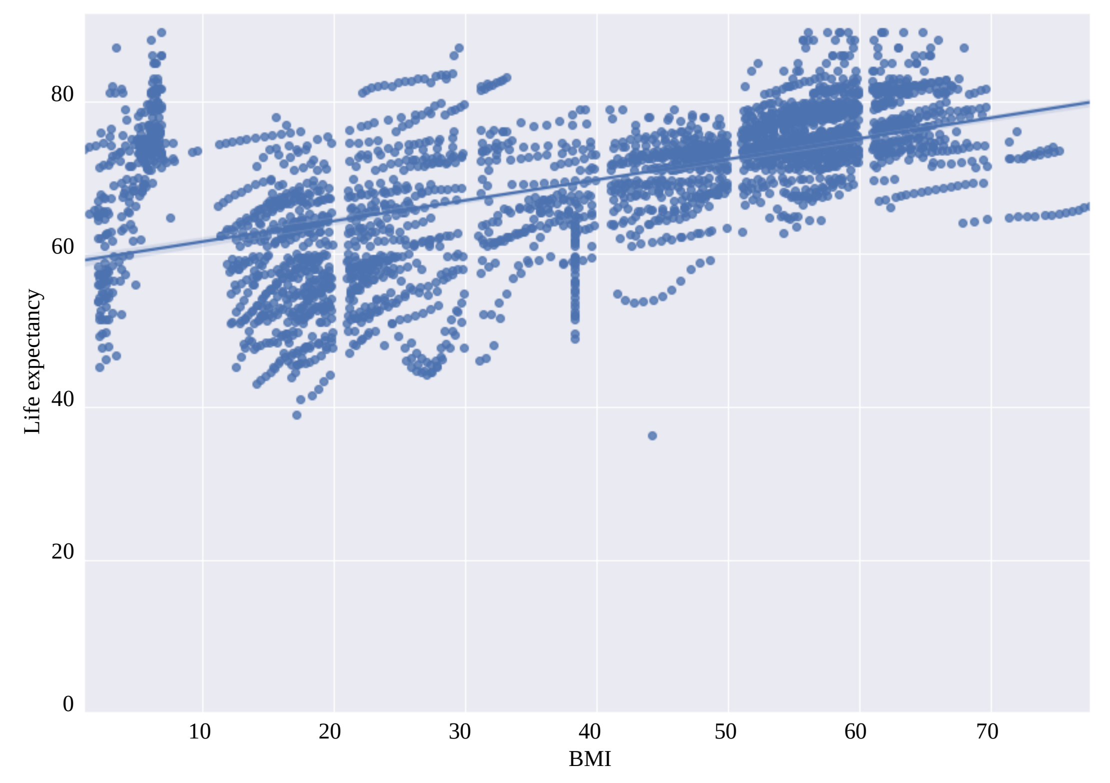


Fig. 5. Correlation between life expectancy and the BMI variable (figure by authors)



Fig. 6. Correlation between life expectancy and the education variable (figure by authors)

Based on the results of the Pearson correlation, we detect the variables that have an influence on life expectancy. However, the Pearson correlation is not sufficient to determine the predictors of life expectancy. For this purpose, we will run several regression models to select the one with the smallest AIC, the highest fit, and the smallest mean square error, R^2 and the smallest root mean square error (RMSE).

Methodology

In order to determine the variables that predict life expectancy, different regression models are used, namely, multiple linear regression, rigid regression and lasso regression. We will then examine the criteria for selecting (p – 1) explanatory variables from the k available explanatory variables. These criteria are: Mallows' Cp criterion, the coefficient of determination, R^2 The Bayesian information criterion (BIC), the Akaike information criterion (AIC).

Multiple linear regression

Multiple linear regression is an immediate generalization of simple linear regression. In multiple linear regression, the function F that we want to estimate no longer depends on a single variable, but on several. If we have n pairs of the form (X_i = ($x_{i,1}$, $x_{i,2}$, ..., $x_{i,m}$) ϵR^m, $y_i \epsilon R^m$), with y_i the result obtained for the observation X_i = ($x_{i,1}$, $x_{i,2}$, ..., $x_{i,m}$), then the function we wish to estimate will be of the general form below :

$$F(X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, ..., x_{i,m}) = a_1 x_{i,1} + a_2 x_{i,2} + ...+ a_m x_{i,m} + a_0. \quad (1)$$

The objective is to estimate the vector A = a_1, a_2 , ..., a_m, a_0 so that the function F is as close as possible to y_i .

As with simple linear regression, the least squares method can be used to find the vector A, and the function to be minimized will be defined as follows:

$$E = \sum_{i=1}^{n}[y_i - F(x_{i,1}, x_{i,2}, ..., x_{i,m})]^2. \quad (2)$$

One of the most difficult aspects of abundant regression algorithms is to determine how to converge to the configurations (a_1, a_2 , ..., a_m, a_0) that yield errors Ɛ = $\hat{y}_i$ - y_i and avoid the trap of over-learning.

The best-known approach to minimizing the error calculation function E while avoiding over-learning is the introduction of the concept of regularization.

There are two regularizations widely used with regression models: the Lasso regularization and the Ridge regularization.

Lasso and Ridge regression

Lasso regression is a regression model in which the selection and regulation of variables take place simultaneously. This method uses a penalty that affects the value of the regression coefficients. With Lasso regularization, the error function to be minimized becomes:

$$E_{Lasso} = \sum_{i=1}^{n}[y_i - F(x_{i,1}, x_{i,2}, ..., x_{i,m})]^2 + \lambda\sum_{i=0}^{m} | a_i|. \quad (3)$$

The difference between E and E_{Lasso} is that in E_{Lasso} we have added the term $\lambda\sum_{i=0}^{m} | a_i|^2$ to further sanction solutions with values of (a_1, a_2 , ..., a_m, a_0).

Ridge regression is a regularised regression algorithm that performs an L2 regularisation by adding an L2 penalty, which is equal to the square of the magnitude of the coefficients. With Ridge regularization, large values of (a_1, a_2 , ..., a_m, a_0) are more protected, and the error function to be minimized becomes:

$$E_{Ridge} = \sum_{i=1}^{n}[y_i - F(x_{i,1}, x_{i,2}, ..., x_{i,m})]^2 + \lambda\sum_{i}^{m} a_i^2. \quad (4)$$

We note that in both the Lasso and Ridge regularization cases, when the value λ is set to 0, then E = E_{Lasso} = E_{Ridge}.

Mallows' Cp criterion

Mallows' Cp is a selection criterion between several regression models. It compares the accuracy and bias of the full model with those of models containing a subset of predictors. Mallows' Cp criterion is defined from the following formula:

$$C_p = \frac{SC_{res}}{\hat{\delta}^2} - (n - 2p). \quad (5)$$

But the problem is that we can no longer estimate δ^2 by $s^2 = \frac{SC_{res}}{n-p}$ because C_p would always be equal to p and then it would no longer be interesting [9]. So, in practice, we estimate δ^2 by the s^2 of the model that involves all k explanatory variables of the available model, then we choose among the models the one for which Mallows' Cp criterion is closest to p.

The coefficient of determination R^2

The website R^2 is the simplest to use. However, with the introduction of new variables, it increases monotonically even if they are weakly correlated with the explained variable. It is therefore advisable to turn to the use of other criteria such as the adjusted R^2adjusted criterion, Mallows' Cp, the AIC and AICc criteria, the BIC criterion.

The adjusted coefficient of determination R^2 is the evolved version of the coefficient of determination R^2.

The adjusted R^2 determines the amount of variance of the dependent variable, which can be explained by the independent variable. On the basis of the fitted value R^2 value, one can judge whether the data in the regression equation are appropriate. The higher the R^2 the higher the fitted value, the better the regression equation because it implies that the independent variable is chosen to determine the dependent variable.

The Bayesian information criterion BIC

The Bayesian Information Criterion (BIC) is derived from the Akaike Information Criterion (AIC) and is defined by : BIC = -2 log (L) + k log (n). It is more parsimonious than the AIC criterion because it penalises the number of variables present in the model more. According to [9], the AIC was introduced to retain the variables relevant to the forecast, whereas the BIC criterion aims at selecting the statistically significant variables in the model.

The Akaike Information Criterion (AIC)

The Akaike Information Criterion (AIC) is a mathematical method that is applied to models estimated by a maximum likelihood method to assess how well a model fits the data from which it was generated. AIC is applied to analysis of variance, multiple linear regression, logistic regression and Poisson regression. The AIC criterion is defined by :

$$AIC = 2K - 2Log(L), \quad (6)$$

where L is the maximised likelihood and k is the number of model parameters. With this criterion, the deviance of the model -2 log (L) is penalised by two times the number of parameters.

Therefore, the AIC represents a compromise between bias, which decreases with the number of parameters, and parsimony, the desire to describe the data with as few parameters as possible.

The rigour would dictate that all models compared should derive from the same 'complete' model included in the list of models compared.

The best model is the one with the lowest AIC. When the number of parameters k is large compared to the number of observations n, i.e., if N/k < 40, it is recommended to use the corrected AIC. The corrected Akaike information criterion, AICc, is defined by:

$$AICc = AIC + \frac{2K(K+1)}{n-K-1}. \quad (7)$$

Results

Our analysis has shown that life expectancy increases over the years, and that it is on average higher in developed countries than in developing countries.

This study has also led us to the conclusion that the model chosen for the selection of life expectancy predictors is multiple linear regression (Table 1), as this model obtained the lowest Akaike information criterion of 6109.07, an adjusted coefficient of 85% and an RMSE of 3.85. R^2 of 85 % and an RMSE of 3.85.

These measures were better than those of the Lasso and Ridge regression models. According to this model and following the p-value of less than $2.2e^{-16}$, all variables are significant, except for: Alcohol, Hepatitis B, Measles, Population, Slimness.1.19, Slimness.5.9. This means that we can do without these variables to explain life expectancy. However, applying the Akaike information criterion to the multiple linear regression model, the variables that best explain life expectancy are: adult mortality, infant deaths, percentage of expenditure, measles, under-five deaths, polio, total expenditure, diphtheria, HIV/AIDS, GDP, thinness. 1.19 years, income composition, and school enrolment.

Table 1

Models	Adjusted R^2	RMSE
Multiple Linear Regression	**0.85**	**3.85**
Lasso Regression	0.82	3.85
Ridge Regression	0.82	3.91

Conclusion

Before analysing this data set, we had the impression that life expectancy could be increased if we had more money. This is because it takes money to be healthy and to receive appropriate medical treatment. Moreover, if a country is economically developed (GDP), all its citizens can afford appropriate medical treatment. This would mean that life expectancy depends largely on economic factors. However, after analysing this dataset, we have concluded that life expectancy is mainly affected by adult mortality, infant mortality, percentage of expenditure, measles, under-five mortality, polio, total expenditure, diphtheria, HIV/AIDS, GDP, wasting. 1.19 years, income composition, and schooling. This makes sense because if a person is educated enough to recognize health problems, they can make appropriate lifestyle changes, including but not limited to diet and exercise, which would ideally extend their life expectancy. Education can change a person's perception and help them understand the benefits of being fit and its impact on health. In addition, a higher level of education could be linked to a higher income, and a higher income would mean higher spending on health and fitness. Thus, education is directly or indirectly a good predictor of life expectancy. Various machine learning models have been used for training. Among these models, the multiple linear model has proven to be very effective in determining both the coefficient of determination and the errors. This model can therefore be used for the prediction of life expectancy.

References

1. Arias E. United States Life Tables, 2009. National Vital Statistics Reports. 2014; 62:1–63.

2. Yafei Wu, Ke Hu, Yaofeng Han, et al. Spatial Characteristics of Life Expectancy and Geographical Detection of Its Influencing Factors in China. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020;17:906. https://doi.org/10.3390/ijerph17030906

3. Ming Wen, Danan Gu. Air Pollution Shortens Life Expectancy and Health Expectancy for Older Adults: The Case of China. The Journals of Gerontology: Series A. 2012;67:1219–1229. https://doi.org/10.1093/gerona/gls094

4. Cervantes PAM, López NR, Rambaud SC. The Relative Importance of Globalization and Public Expenditure on Life Expectancy in Europe: An Approach Based on MARS Methodology. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020;17:8614. http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17228614

5. Reynolds MM, Avendano M. Social Policy Expenditures and Life Expectancy in High-Income Countries. American Journal of Preventive Medicine. 2018;54:72–79. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2017.09.001

6. Sede IP, Ohemeng W. Socio-economic determinants of life expectancy in Nigeria (1980–2011). Health Economics Review. 2015;5:1–11.

7. Daquan Huang, Shuimiao Yang, Tao Liu. Life Expectancy in Chinese Cities: Spatially Varied Role of Socioeconomic Development, Population Structure, and Natural Conditions. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020;17:6597. http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17186597

8. Okamoto, K. Life Expectancy at Age 65 and Environmental Factors: An Ecological Study in Japan. Archives of Gerontology and Geriatrics. 2006;43:85–91. http://dx.doi.org/10.1016/j.archger.2005.09.005

9. WHO. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. World Health Organization, 2016. 121 p. https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141

10. Xinjie Zha, Yuan Tian, Xing Gao, et al. Quantitatively Evaluate the Environmental Impact Factors of the Life Expectancy in Tibet, China. Environmental Geochemistry and Health. 2019;41:1507–1520. https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-018-0211-z

11. Nkalu CN, Edeme RK. Environmental Hazards and Life Expectancy in Africa: Evidence from GARCH Model. *SAGE* Open; 2019, 9. https://doi.org/10.1177/2158244019830500

12. Inglehart Ronald, Christian Welzel. How Development Leads to Democracy What We Know About Modernization. Foreign Affairs. 2009;88:33–48.

13. Cockerham WC. The Social Determinants of the Decline of Life Expectancy in Russia and Eastern Europe: A Lifestyle Explanation. Journal of Health and Social Behavior. 1997;38:117–130.

14. Jessica Y Ho, Arun S Hendi. Recent Trends in Life Expectancy across High Income Countries: Retrospective Observational Study. BMJ. 2018;362:k2562. https://doi.org/10.1136/bmj.k2562

15. Penuelas J, Krisztin T, Obersteiner M, et al. Country-Level Relationships of the Human Intake of N and P, Animal and Vegetable Food, and Alcoholic Beverages with Cancer and Life Expectancy. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020;17:7240. https://doi.org/10.3390/ijerph17197240

16. Sidey-Gibbons JAM, Sidey-Gibbons CJ. Machine Learning in Medicine: A Practical Introduction. BMC Medical Research Methodology. 2019;19:1–18. https://bmcmedresmethodol.biomedcentral.com/ articles/10.1186/s12874-019-0681-4

17. Malpe V, Tugaonkar P. Machine Learning Trends in Medical Sciences. In: Proc. 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), August 2018. P. 495–499.

18. KumarRajarshi. WHO. Life Expectancy. Statistical Analysis on Factors Influencing Life Expectancy. https://www.kaggle.com/datasets/kumarajarshi/life-expectancy-who

19. Thu Pham-Gia, Vartan Choulakian. Distribution of the Sample Correlation Matrix and Applications. Open Journal of Statistics. 2014;4:48571. 10.4236/ojs.2014.45033

20. Svensson K. Predicting Life Expectancy Using Machine Learning. 2018. https://www.semanticscholar.org/paper/Predicting-Life-Expectancy-Using-Machine-Learning-Svensson/984adbb5aee 16d38a6686895dda2afd3087b2261

21. Müller AC, Guido S. Introduction to Machine Learning with Python.,1st ed. O'Reilly Media, Inc.; 2016.

22. Ki-Young Lee, Kyu-Ho Kom, Jeong-Jin Kang, et al. Comparison and Analysis of Linear Regression and Artificial Neural Network. International Journal of Applied Engineering Research. 2017;12:9820–9825.

23. Paranjape RS, Challacombe SJ. HIV/AIDS in India: An Overview of the Indian Epidemic. Oral Diseases. 2016;22:10–14. http://dx.doi.org/10.1111/odi.12457

24. Haebong Woo. Patterns and Evolution of Life Span Inequality Using the Gini Coefficient. Pogŏn Sahoe Yŏn'gu. 2013;33:419–451. 10.15709/hswr.2013.33.4.419. https://www.researchgate.net/publication/275246163_Patterns_and_Evolution_of_Life_Span_Inequality_Using_the_Gini_Coefficient

25. Chen Wu. Human Capital, Life Expectancy, and the Environment. Journal of International Trade and Economic Development. 2017;26:885–906.

26. Carolina Cosculluela-Martínez, Raquel Ibar Alonso, Geoffrey JD Hewings. Life Expectancy Index: Age Structure of the Population and Environmental Change. Social Indicators Research. 2019;142:507–522.

27. Muhamad Haroon Shah, Nianyong Wang, Irfan Ullah, et al. Does Environment Quality and Public Spending on Environment Promote Life Expectancy in China? Evidence from a Nonlinear Autoregressive Distributed Lag Approach. International Journal of Health Planning and Management. 2021;36:545–560. http://dx.doi.org/10.1002/hpm.3100

28. Mariani F, Pérez-Barahona A, Raffin, N. Life Expectancy and the Environment. Journal of Economic Dynamics and Control. 2010;34:798–815.

29. Tuljapurkar Sh, Horvitz CC. From Stage to Age in Variable Environments: Life Expectancy and Survivorship. Ecology. 2006;87:1497–1509. http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1497:FSTAIV]2.0.CO;2

30. Kampa M, Castanas E. Human Health Effects of Air Pollution. Environmental Pollution. 2008;151:362–367. http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012

31. Tagaris E, Kuo-Jen Liao, DeLucia AJ, et al. Potential Impact of Climate Change on Air Pollution-Related Human Health Effects. Environmental Science and Technology. 2009;43:4979–4988.

32. Anderson JO, Thundiyil JG, Stolbach, A. Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. Journal of Medical Toxicology. 2012;8:166–175. http://dx.doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1

33. Wuffle A, Brians CL, Coulter K. Taking the Temperature: Implications for the Adoption of Election Day Registration, State level Voter Turnout, and Life Expectancy. PS: Political Science & Politics**.** 2012;45:78–82.

34. Brunner E, Maruyama K. SP4-32 Health and Sustainability: An International Ecological Study of Carbon Dioxide Emissions and Life Expectancy. Journal of Epidemiology and Community Health. 2011;65:A442–A443.

35. Clootens N. Public Debt, Life Expectancy, and the Environment. Environmental Modeling & Assessment. 2017;22:267–278.

36. Tetzlaff F, Epping J, Sperlich S, et al. Widening Income Inequalities in Life Expectancy? Time Trend Analysis Using German Health Insurance Data. Journal of Epidemiology and Community Health. 2020;74:592–597. 10.1136/jech-2019-212966

Received 14.09.2022.
Revised 17.10.2022.
Accepted 18.10.2022.

About the Authors:

Brou Kouame Amos, postgraduate of the Information Technology Department, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN) (6, Miklikho-Maklaya St., Moscow, 117198, RF), broukouameamos9@gmail.com

Smirnov, Ivan V., associate professor of the Information Technology Department, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN) (6, Miklikho-Maklaya St., Moscow, 117198, RF), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor, ORCID, Scopus, smirnov-iv@rudn.ru

Claimed contributorship:

Brou Kouame Amos: basic concept formulation; research objectives and tasks; data pre-processing; analysis of research results. I. V. Smirnov: work control; the text revision; correction of the conclusions.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Бру Куамэ Амос, аспирант кафедры «Информационные технологии» Российского университета дружбы народов (117198, РФ, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6), broureino9@gmail.com

Смирнов Иван Валентинович, доцент кафедры «Информационные технологии», Российского университета дружбы народов» (117198, РФ, г. Москва, Миклухо-Маклая, 6), кандидат физико-математических наук, доцент, Scopus, ORCID, smirnov-iv@rudn.ru

Заявленный вклад соавторов:

К. А. Бру: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, предварительная обработка данных и анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов, сбор данных и доработка текста. И. В. Смирнов: контроль за работой, доработка текста и корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT







УДК 004.01
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-384-390

Научная статья



Разработка архитектуры по подключению системного модуля для людей с ограниченными возможностями

А. А. Баскаков ✉, **А. Г. Тарасов**
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Российская Федерация, г. Москва, Вадковский пер., 1
✉ aleks.baskakov@mail.ru

Аннотация
Введение. Для разработки новых системных модулей программного обеспечения помощи сотрудникам с ограниченными возможностями требуется проработать архитектурное решение для взаимодействия всех частей системы. В результате анализа и проектирования необходимо получить программную архитектуру, которая должна выполнять ряд стандартных требований. В первую очередь она должна быть безопасной. Для этого следует учитывать систему логирования ошибок, аудирование событий, возможность отключения функционала непосредственно после вывода в промышленную эксплуатацию, внутренние механизмы валидации входных запросов клиента и ответов сервера. Данная работа посвящена выработке основных вариантов обслуживания системы, анализу исключительных ситуаций при взаимодействии с пользователем для дальнейшей оценки эффективности архитектуры и непосредственной разработки проекта.
Материалы и методы. Архитектурное решение проводилось при помощи языка графического описания (Unified Modeling Language, UML), который помогает строить визуальные изображения жизненного цикла и взаимодействия всех компонентов системы. Для проработки взаимодействия основных модулей будущей системы использовался синтаксис диаграммы развертывания (deployment diagram UML). Для обработки жизненного цикла — синтаксис диаграммы последовательности действий (sequence diagram UML). Помимо этого использовалась диаграмма прецедентов для описания основных сценариев использования.
Результаты исследования. Разработана архитектура, имеющая схему взаимодействия отдельных модулей и систем, а также варианты использования программного комплекса для будущей реализации программного продукта. Предложенная архитектура системы соответствует требованиям безопасности, надёжности (отказоустойчивости) и производительности. Авторами зафиксированы функциональные требования системы помощи сотрудникам предприятий с проблемами слуха для возможности их трудоустройства и работы по телекоммуникационной сети интернет. Выработаны основные вариации обслуживания системы.
Обсуждение и заключения. Построение грамотной архитектуры позволяет учесть ситуации, выходящие за рамки нормального использования системы, а также использовать нечеткую модель для определения эффективности системы. Дальнейшее углубленное описание вариантов развёртывания и эксплуатации позволит реализовать эффективную и производительную систему.

Ключевые слова: диаграмма развертывания UML, диаграмма последовательности UML, архитектура программного обеспечения, коммерческое программное обеспечение, диаграмма прецедентов UML.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Когану Юрию Григорьевичу, кандидату технических наук, доценту кафедры Информационных технологий и вычислительных систем МГТУ «СТАНКИН», участвующему в разработке вариантов использования системы в роли эксперта данной области.

Для цитирования. Баскаков, А. А. Разработка архитектуры по подключению системного модуля для людей с ограниченными возможностями / А. А. Баскаков, А. Г. Тарасов // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 384–390. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-384-390

Original article

Development of Architecture for Connecting a System Module for People with Disabilities

Alexey A. Baskakov, **Alexey G. Tarasov**
Moscow State University of Technology (MSUT "STANKIN"), 1, Vadkovsky Lane, Moscow, Russian Federation
aleks.baskakov@mail.ru

Abstract
Introduction. To develop new system modules of software to help employees with disabilities, it is required to work out an architectural solution for the interaction of all parts of the system. As a result of the analysis and design, it is necessary to obtain a software architecture that must meet a number of standard requirements. First of all, it should be safe. To do this, you should take into account the error logging system, event auditing, the possibility of disabling the functionality immediately after putting it into commercial operation, internal mechanisms for validating client input requests and server responses. This study is aimed at the development of basic system maintenance options, the analysis of exception cases under interacting with the user for further evaluation of the architecture efficiency, and the direct project development.
Materials and Methods. The architectural decision was carried out using the Unified Modeling Language (UML), which helps to build visual images of the life cycle and interaction of all components of the system. The syntax of the UML deployment diagram was used to study the interaction of the main modules of the future system, and the syntax of the UML sequence diagram was used to process the lifecycle. A use case diagram was also applied to describe the main use cases. To study the interaction of the main modules of the future system, the UML deployment diagram syntax was used. For life cycle processing, the UML sequence diagram syntax was applied. In addition, a use case diagram was applied to describe the base use cases.
Results. An architecture that has a scheme for the interaction of individual modules and systems, as well as options for using the software package for the future implementation of the software product, has been developed. The proposed system architecture meets the requirements of security, reliability (fault tolerance), and performance. The authors have fixed the functional requirements of the system of assistance to employees of enterprises with hearing problems for the possibility of their employment and work on the telecommunication Internet. Basic variations of system maintenance have been developed.
Discussion and Conclusions. Building a competent architecture provides taking into account cases that go beyond the normal use of the system, and applying a fuzzy model to determine the system efficiency. Further in-depth description of deployment and operation options will enable to implement an efficient and productive system.

Keywords: UML deployment diagram, UML sequence diagram, software architecture, commercial software, UML use case diagram.

Acknowledgements. The authors would like to thank Yuri G. Kogan, Cand.Sci. (Engineering), associate professor of the Department of Information Technologies and Computing Systems, STANKIN Moscow State Technical University, who participated in the development of the system use cases as a subject matter expert.

For citation. A. A. Baskakov, A. G. Tarasov. Development of Architecture for Connecting a System Module for People with Disabilities. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 384–390. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-384-390

Введение. Исследование причин нетрудоспособности среди населения с инвалидностью ранее проводили путем использования экспертного оценивания методом попарных сравнений Томаса Л. Саати. В результате было выявлено, что для улучшения трудоспособности требуется разработать комплексную систему для решения проблемы потери слуха и возможности работать в центрах удаленной поддержки, где понимание собеседника является обязательным [1]. Перед оценкой эффективности требуется выработать все возможные варианты обслуживания системы. Это позволит определить эффективность сервисной архитектуры, связанной с выполнением каждым модулем нужного уровня обслуживания. Для уменьшения трудозатрат на этапе разработки необходимо предварительное определение исключительных ситуаций при работе модуля с транскрибированием.

Научная новизна данного исследования состоит в эффективности архитектуры относительно решаемых задач (вариантов обслуживания).

Оценка производилась при помощи нечеткой модели мнений эксперта в данной области и выходит за рамки обсуждения данной статьи.

Для разработки архитектуры нужно учитывать следующие параметры:

– кроссплатформенность — программный продукт должен охватывать основные операционные системы;

– отказоустойчивость — система должна стабильно работать в случае перебоев в работе;

– безопасность — система должна поддерживать логирование, мониторинг и аудирование событий пользователя;

– горизонтальную масштабируемость — при увеличении количества клиентов программный продукт должен работать с той же скоростью за счет увеличения количества серверов;

– производительность — система должна работать без задержек в режиме реального времени.

Планирование и описание программной архитектуры — важный и необходимый шаг перед непосредственной разработкой клиент-серверного приложения. Система должна иметь модуль для распознавания речи и переводить ее в текст, тем самым позволяя людям с проблемами слуха работать на удаленной поддержке.

Материалы и методы. UML — это специальный язык моделирования, который применяется при разработке архитектуры вычислительных систем, программного обеспечения, сетевой архитектуры и при построении бизнес-процессов[1] [2, 3].

Для описания архитектуры проекта использовались следующие схемы:

1. Диаграмма последовательности (т. н. sequence diagram) — описывает процесс приема звонков и их обработки с точки зрения сотрудника организации[2].

2. Диаграмма прецедентов (т. н. use case diagram) — описывает варианты использования системы.

3. Диаграмма развертывания (т. н. deployment diagram) — описывает архитектуру системы.

Результаты исследования. Построение UML диаграмм позволило определить критерии качества обслуживания системы, учесть исключительные ситуации и способы их обработки, а построение диаграммы развертывания — определить эффективность системы, используя нечеткую модель.

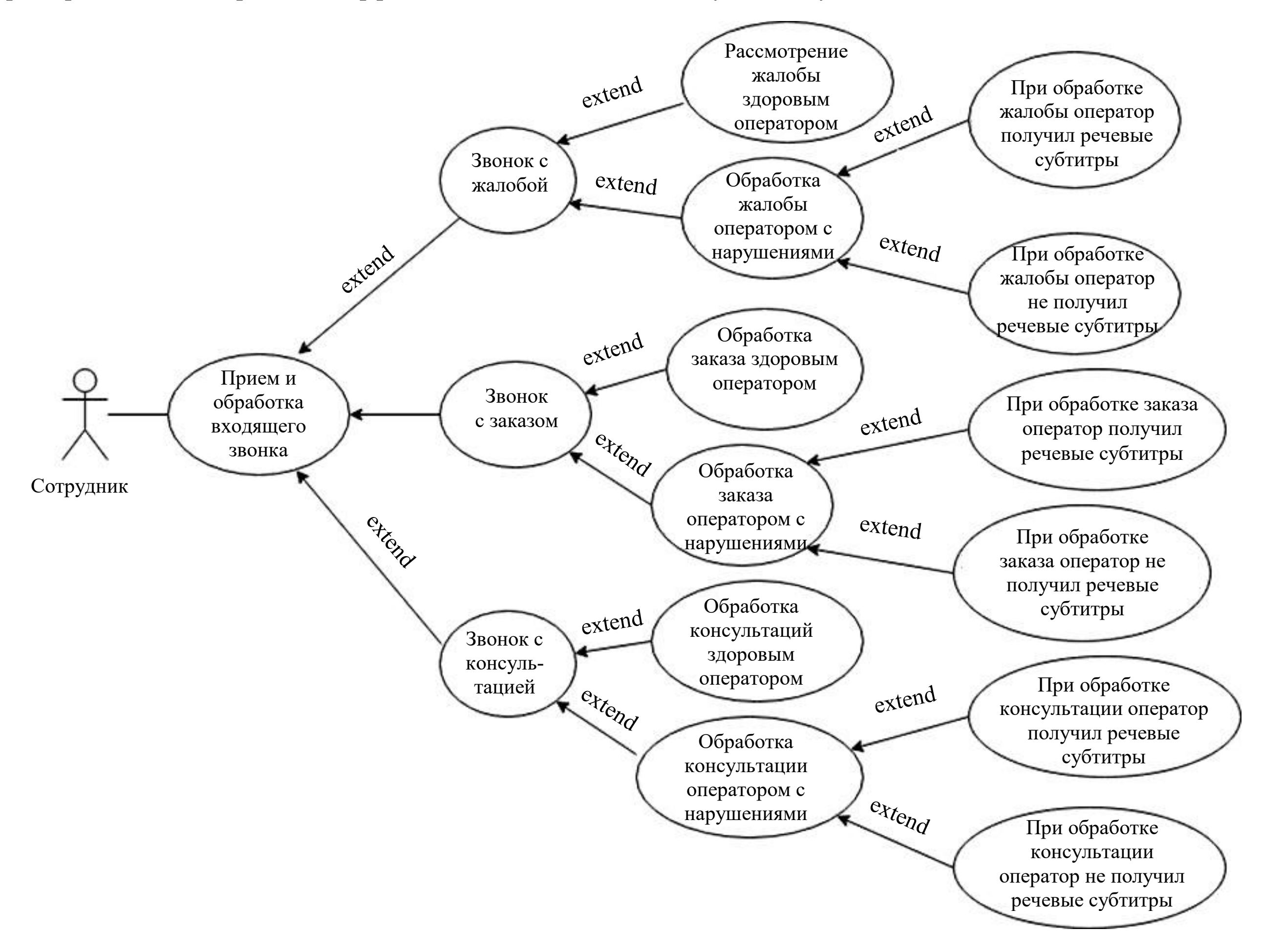


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования системы (рисунок авторов)

[1] Хамматова Л. А. Универсальный язык моделирования UML, основные диаграммы и проблемы использования // Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы : сб. ст. XIII междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2019. С. 88–90.

[2] Тесленко И. Б., Царев А. О. Особенности информационного проектирования с использованием языка UML // Инновационное развитие социально-экономических систем: условия, результаты и возможности : ма-лы V междунар. науч.-практ. конф. Орехово-Зуево, 2017. С. 174–177.

На рис. 1 показана диаграмма прецедентов, разработанная авторами данной статьи, которая показывает, что основные запросы к удаленной поддержке поступают по следующим причинам: жалобы на оказание услуг предприятием, консультация и заказ услуг. При этом стоит учитывать, что система автоматической генерации субтитров может отрабатывать некорректно по некоторым причинам — не смогла распознать речь, не пройдена фильтрация запрещенных слов и т.д. В таком случае следует переключать клиента на роботизированную систему или другого оператора.

Роботизированная система представляет собой модуль автоматической генерации голоса с собственным жизненным циклом, позволяющим проинформировать клиента о технических проблемах во время звонка. Модуль также позволяет по воле клиента переключиться на другого свободного оператора или занять очередь в случае большой нагрузки в данный момент времени.

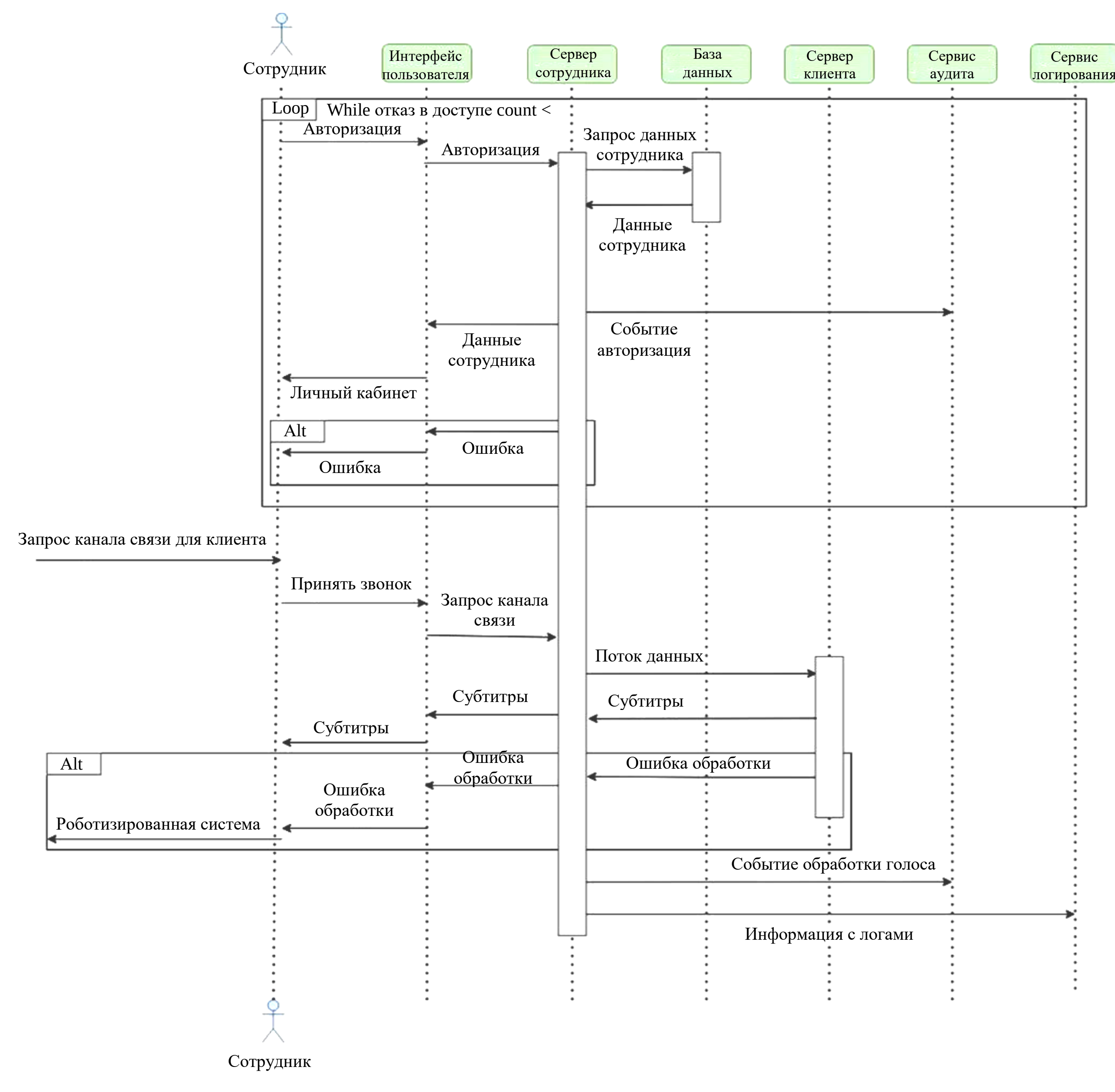


Рис. 2. Диаграмма последовательности действий сотрудника (рисунок авторов)

На рис. 2 показана диаграмма последовательности действий с точки зрения сотрудника организации. После стандартной процедуры авторизации через широковещательный канал в личный кабинет сотрудника может поступить звонок от клиента. В случае принятия звонка, между клиентом и сотрудником будет установлен непрерывный канал передачи информации. Полученные данные в режиме реального времени передаются в модуль обработки, где при помощи набора преобразований и методов генерируются текстовые субтитры.

В случае ошибки преобразования, клиент переключается на роботизированную систему, а сотрудник уведомляется о невозможности обработки голоса. Все действия (события) клиента и сотрудника отмечаются в модуле аудирования и логирования.

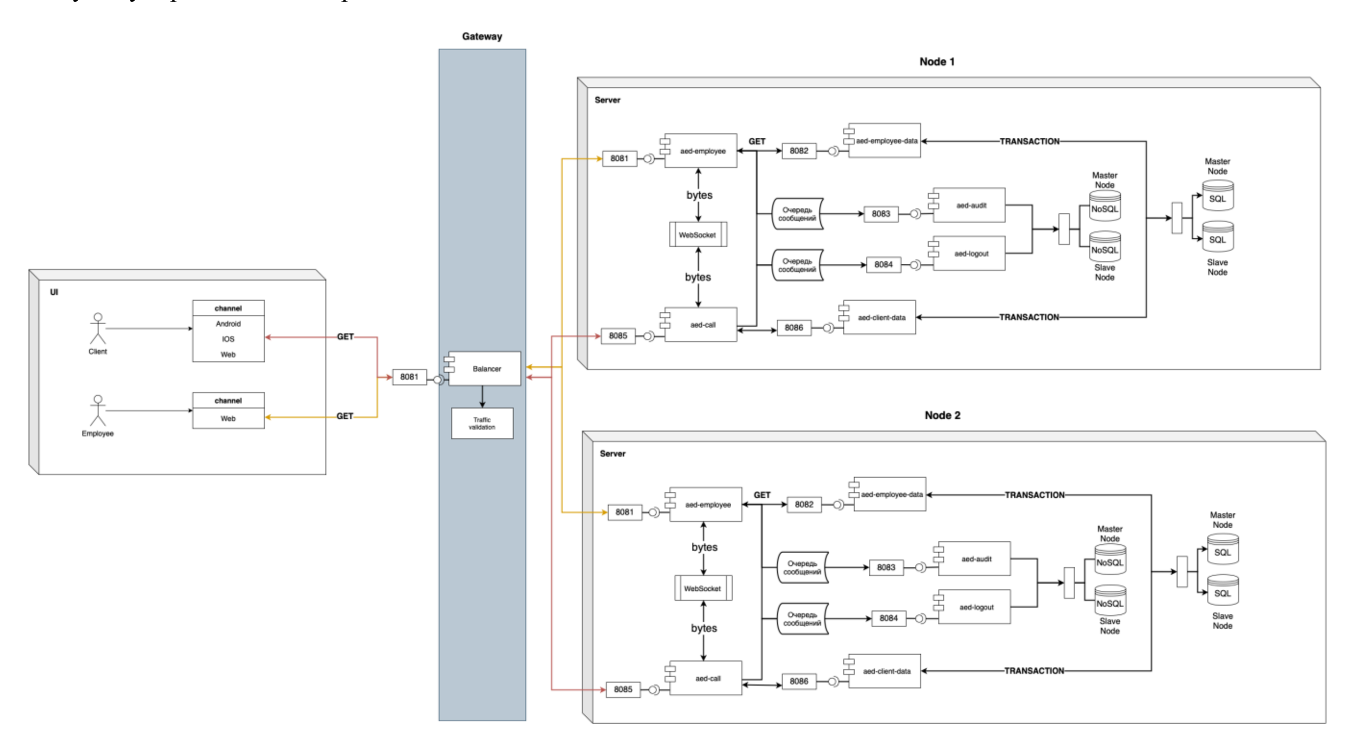


Рис. 3. Диаграмма развертывания компонентов системы (рисунок авторов)

На рис. 3 представлена диаграмма развертывания проекта микросервисной архитектуры [4, 5], которая состоит из трех блоков.

Internet. В сети интернет расположены визуальные модули для взаимодействия пользователя и клиента (User Interface, UI). Стоит заметить, что каналы для реализации у клиента представлены тремя платформами: IOS, Android, Web, тогда как у сотрудника — только Web-каналом. В первую очередь, это связано с тем, что сотруднику обычно не требуется подобные приложения под мобильные операционные системы из-за характера работы и безопасности.

Шлюз передачи данных. Основная задача шлюза — обеспечить передачу информации из сети интернет в локальную сеть, где развернуты основные сервера, и обратно. Это дает ряд преимуществ. Во-первых, появляется общая точка для передачи всех данных. Невозможно взаимодействовать с сервером в обход шлюза безопасности. Во-вторых, все запросы можно проверять на соответствие изначально заложенному формату. В-третьих, шлюз позволят балансировать нагрузку между узлами, тем самым достигается отказоустойчивость. Если один узел перестанет функционировать, все запросы будут автоматически распределены между другими узлами. В-четвертых, систему можно легко масштабировать. Если количество запросов со временем вырастет, достаточно добавить новый узел и производительность останется на прежнем уровне.

Узлы. Это комплексная система, состоящая из сервисов, взаимодействующих между собой. Основные из них — это сервис для получения запросов от клиента и сотрудника. Их задача получить запрос, обработать его и настроить взаимодействие между собой при помощи специальных компонентов — сокетов, которые позволяют обмениваться данными в режиме реального времени. Эти компоненты получают данные о клиенте и сотруднике из специальных сервисов, взаимодействующих с реляционной базой данных при помощи языка SQL [6]. Для отказоустойчивости и скорости база данных также имеет несколько узлов, но не менее двух. Все действия пользователя и клиента передаются в сервисы аудирования и логирования при помощи очередей сообщений. Это дает некоторые преимущества — асинхронность передачи данных и сохранность всей информации в случае отказа сервисов. При этом хранение такой информации нецелесообразно в реляционной базе в связи с однотипностью и простотой структуры. По этой причине желательно использовать документно-ориентированную СУДБ NoSQL [7, 8][3]. Стоит заметить, что независимые базы данных в каждом из узлов

[3] Попов В. Б., Гавриков И. В. Технологии «NOSQL» в алгоритмах анализа больших данных и искусственном интеллекте // Проблемы информационной безопасности : сб. тр. V всерос. с междунар. участием науч.-практ. конф. Симферополь, Гурзуф, 2019. С. 158–160.

обеспечивают высокую производительность, а консистентность и актуальность данных реализуется через механизм, репликации которого будут подробно описаны в следующих исследованиях. Механизм «Master-Slave» в реляционных и нереляционных базах данных необходим для возможного вертикального масштабирования и минимизации затрат ресурсов в случае увеличения нагрузки на отдельный узел.

Все запросы из сети Internet в локальную сеть происходят по протоколу HTTP следующими методами:

– GET — в случае получения информации от любого из модулей;
– POST — в случае создания записей в любом из модулей;
– PUT — в случае изменения в любом из модулей.

Запросы к сохраняемой информации происходят внутри транзакций для обеспечения целостности данных [9–11].

Обсуждение и заключения. Разработка архитектуры, используя язык графического описания, позволяет наглядно описывать функциональные требования к системе, оценивать её эффективность и уменьшать количество ошибок.

Диаграмма вариантов использования позволила, в случае возникновения исключительных ситуаций при транскрибировании голоса, выявить необходимость разработки роботизированной системы, а также определить множество вариантов обслуживания для нечеткой модели. Диаграмма развёртывания помогла определить эффективность выполнения функций каждым внутренним сервисом, а диаграмма последовательности действий — определить жизненный цикл продукта.

Список источников

1. Баскаков, А. А. К проблеме использования автоматизированного рабочего места людьми с ограниченными возможностями / А. А. Баскаков, А. Г. Тарасов // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 3. — С. 290–296. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-290-296

2. From UML State Machine Diagram into FPGA Implementation / G. Bazydto, M. Adamski, M. Węgrzyn, A. Rosado Munoz // IFAC Proceedings Volumes. — 2013. — Vol. 46. — P. 298–303. https://doi.org/10.3182/20130925-3-CZ-3023.00061

3. Shailaja Uke. UML Based Modeling for Data Aggregation in Secured Wireless Sensor Network / Shailaja Uke, Ravindra Thool // Procedia Computer Science. — 2016. — Vol. 78. — P. 706–713. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.02.120

4. Saulo S.de Toledo. Identifying Architectural Technical Debt, Principal, and Interest in Microservices: A Multiple-Case Study / Saulo S. de Toledo, Antonio Martini, Dag I. K. Sjøberg // Journal of Systems and Software. — 2021. — Vol. 177. — Art. 110968. https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.110968

5. Nuno Mateus-Coelho. Security in Microservices Architectures / Nuno Mateus-Coelho, Manuela Cruz-Cunha, Luis Gonzaga Ferreira // Procedia Computer Science. — 2021. — Vol. 181. — P. 1225–1236. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.320

6. Григорьев, Ю. А. Оценка времени выполнения сложного SQL-запроса в СУБД MS SQL SERVER 2000 / Ю. А. Григорьев, В. Г. Матюхин // Информатика и системы управления. — 2004. — С. 3–13.

7. Давыдов, Д. А. Тенденции развития NOSQL-СУБД / Д. А. Давыдов, П. С. Манылов // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 3. — С. 131–135.

8. Шарипова, Н. Н. Об использовании NOSQL-хранилищ данных / Н. Н. Шарипова // Wschodnioeuropejskie czasopismo naukowe. — 2016. — Т. 9, № 3. — С. 73–76.

9. Chodak, G. HTTP-Level E-Commerce Data Based on Server Access Logs for an Online Store / G. Chodak, G. Suchacka, Y. Chawla // Computer Networks. — 2020. — Vol. 183. — Art. 107589. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107589

10. Okumura, N. Formal Analysis of RFC 8120 Authentication Protocol for HTTP under Different Assumptions / N.Okumura, K. Ogata, Y. Shinoda // Journal of Information Security and Applications. — 2020. — Vol. 53. — Art. 102529. https://doi.org/10.1016/j.jisa.2020.102529

11. Mattson, R. L. R. HTTP-MPLEX: An Enhanced Hypertext Transfer Protocol and Its Performance Evaluation / Robert L. R. Mattson, Somnath Ghosh // Journal of Network and Computer Applications. —2009. — Vol. 32. — P. 925–939. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2008.10.001

Поступила в редакцию 10.09.2022.
Поступила после рецензирования 24.10.2022.
Принята к публикации 24.10.2022.

Об авторах:

Баскаков Алексей Андреевич, аспирант кафедры «Информационные технологии и вычислительные системы» Московского технологического университета «МГТУ СТАНКИН» (127055, РФ, г. Москва, Вадковский пер., 1), ORCID, aleks.baskakov@mail.ru

Тарасов Алексей Геннадиевич, доцент кафедры «Информационные технологии и вычислительные системы» Московского технологического университета «МГТУ СТАНКИН» (127055, РФ, г. Москва, Вадковский пер., 1), кандидат технический наук, ORCID, tarasov.ag@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Баскаков — проведение расчетов, подготовка текста, поиск научной литературы, формирование выводов. А. Г. Тарасов — научное руководство, формирование цели и задач, корректировки текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.